



REVISTA
cartográfica

Número 98 / enero-junio 2019



Instituto Panamericano de
Geografía e Historia

**AUTORIDADES DEL
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
2017-2021**

PRESIDENTE	Lic. Israel Sánchez	Panamá
VICEPRESIDENTE	Mag. Alejandra Coll	Chile

SECRETARIO GENERAL
Mag. César Rodríguez Tomeo
Uruguay

COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA

(Costa Rica)

Presidente:

Mag. Max Lobo

Vicepresidente:

Mag. Álvaro Antonio Álvarez

COMISIÓN DE HISTORIA

(México)

Presidenta:

Dra. Patricia Galeana Herrera

Vicepresidente:

Mtro. Rubén Ruiz

COMISIÓN DE GEOGRAFÍA

(Estados Unidos de América)

Presidenta:

Dra. Patricia Solís

Vicepresidenta:

Geóg. Jean W. Parcher

COMISIÓN DE GEOFÍSICA

(Ecuador)

Presidente:

Dr. Mario Ruiz

Vicepresidente:

Dra. Alexandra Alvarado

MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA

Argentina

Belice

Bolivia

Brasil

Chile

Colombia

Costa Rica

Ecuador

El Salvador

Estados Unidos de América

Guatemala

Haití

Honduras

México

Nicaragua

Panamá

Paraguay

Perú

República Dominicana

Uruguay

Venezuela

Agrimensor Sergio Rubén Cimbaro Sr.

Wilbert Vallejos

Cnl. DAEN José Oviedo Bustillos

João Bosco de Azevedo

Dr. Carlos Mena Frau

Fernando León Rivera

Sr. Xavier Molina

Sr. Mario Antonio Zeledón Flores

Eric Van Praag

Ing. Marcos Osmundo Sutuc Carillo Ing.

Arch. Pierre Alexilien Versaille Arq.

Marilyn Villatoro

Ing. Raúl Ángel Gómez Moreno

Lic. Israel Sánchez

Cnel. SG Antonio Gavilán Estigarribia

Mayor EP Reynaldo Flores Rivero

Geóg. Susana Hernández

Cnel. Daniel Píriz

Ing. Sergio Rodríguez

COMITÉS DE LA COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA

Normas y estándares de Información Geográfica

(Colombia)

Cartografía Temática

Infraestructura de Datos Geospaciales

(Ecuador)

INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

REVISTA **cartográfica**



NÚMERO 98

ENERO-JUNIO 2019

REVISTA CARTOGRÁFICA

Publicación anual fundada en 1952
Indizada en PERIÓDICA y Latindex
Disponible en: Cengage Learning, Ebsco y ProQuest

La preparación de la REVISTA CARTOGRÁFICA
está a cargo de la editora María Ester Gonzalez
Universidad de Concepción
Juan Antonio Coloma 0201, CP 4440000
Los Ángeles, Chile
Teléfono: +56 432405244
Correo electrónico: editor_revista_cartografica@ipgh.org.

Canje, venta y distribución de publicaciones, escribir a:
Instituto Panamericano de Geografía e Historia
Secretaría General
Apartado Postal 18879, C.P. 11870 Ciudad de México, México
Teléfonos: (52-55)5277-5888, 5515-1910
Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org <http://www.ipgh.org>

Las opiniones expresadas en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la REVISTA CARTOGRÁFICA, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores. Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia son de la Dirección de la Revista.

En cumplimiento con la resolución IX de la XIV Reunión del Consejo Directivo del IPGH, celebrada en julio de 1972, en Buenos Aires, Argentina, se advierte que: "Los límites que aparecen en los mapas de esta publicación no están, en algunos casos, finalmente determinados y su reproducción no significa aprobación oficial o aceptación por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)".

Diseño de portada / Cover design / Design da capa: Hanss Rivera

© 2019 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Revista Cartográfica, núm. 98, enero-junio 2019, es una publicación semestral editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ex arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Tels. (52-55)5277-5888, 5515-1910, www.ipgh.org, publicaciones@ipgh.org. Editora: María Ester Gonzalez, correo electrónico: editor_revista_cartografica@ipgh.org. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2015-090212390600-203 otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. ISSN (en línea) 2663-3981. Licitud de título y contenido: en trámite. Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Publicaciones del IPGH, Ex arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Fecha de última modificación: 03 de abril de 2019.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

REVISTA cartográfica

NÚMERO 98

ENERO-JUNIO 2019

Contenido

Nota Editorial	7
Artículos científicos	
Admissible relative errors of the parcel aerea of a land parcel map base created as a synthesis of indiviual survey maps <i>Andrea Barbieri</i> <i>Carlos López-Vázquez</i>	13
Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba <i>Luciana Maria da Silva</i> <i>Sílvio Rogério Correia de Freitas</i>	33
Automatic evaluation of geospatial data quality using web services <i>Emerson M. A. Xavier</i> <i>Francisco J. Ariza-López</i> <i>Manuel A. Ureña-Cámara</i>	59
Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del Ecuador utilizando tecnología LiDAR aerotransportada <i>Xavier Molina S.</i> <i>Mercedes Farjas A.</i> <i>Juan Carlos Ojeda M.</i>	75
Experiencias cognitivas en la interpretación de un mapa dasimétrico de densidad de población para la región Pátzcuaro Zirahuén, Michoacán, México <i>Jesús Abraham Navarro Moreno</i>	97
Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo <i>Fernando Pavón</i> <i>Daniel Andrade</i> <i>Benjamin Bernard</i> <i>Diana Contreras</i>	123

Comparison of maximum likelihood estimators and regression models for burn severity mapping in Mediterranean forests using Landsat TM and ETM+ data <i>Alexander Ariza</i> <i>Javier Salas Rey</i> <i>Silvia Merino de Miguel</i>	145
Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira <i>Eurico Lourenço Nicacio Junior</i>	179
Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas <i>Wendy Romero-Rojas</i> <i>René Vázquez-Jiménez</i> <i>Rocío N. Ramos-Bernal</i>	201
Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite <i>Carlos González-Luna</i> <i>Anatoliy Filonov</i> <i>Omar Mireles</i> <i>Iryna Tereshchenko</i>	223
Análisis espacial de los cambios de usos del suelo. Aplicación con Sistemas de Información Geográfica <i>Luis Humacata</i>	239
Zonificación de las áreas propensas a incidentes por ataques de <i>Crocodylus acutus</i> en el Pacífico Central de Costa Rica utilizando un Sistema de Información Geográfico <i>Luis Fernando Sandoval Murillo</i> <i>Carlos Morera Beita</i> <i>Iván Sandoval Hernández</i>	259
Os mapas como operadores na gênese da cidade espraiada. Desconstrução e semiose cartográfica na análise das plantas da cidade de São Paulo entre 1877 e 1930 <i>Eliane Kuvasney</i>	281
Accesibilidad peatonal a los servicios educativos de la ciudad de Ibagué- Tolima, Colombia <i>Mailen Stephany Alvarez Rojas</i> <i>Elia Quirós Rosado</i> <i>José Antonio Gutiérrez Gallego</i>	305
Instructivo para autores	329

Comité Editorial

Revista Cartográfica número 98

Alfonso Tierra

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE
(Ecuador)

Alicia Rivas Medina

Universidad de Concepción
(Chile)

Ana María Pacheco

Universidad Nacional de San Juan
(Argentina)

Andrea E. Izquierdo

CONICET/IER-UNT
(Argentina)

Andreas Hendricks

Universität der Bundeswehr München
(Alemania)

Amilcar Morales Gamas

Centro de Investigación en Ciencias de Información
Geoespacial (México)

Antonio Vázquez Hoehne

Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Antonio Galán de Mera

Universidad CEU San Pablo
(España)

Cecilia Cornero

Universidad Nacional de Rosario
(Argentina)

Clodoveu Augusto Davis Junior

Universidade Federal de Minas Gerais
(Brasil)

Carlos Arturo Aguirre-Salado

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
(México)

Carlos Reinoza Gómez

Fundación Venezolana de Investigaciones
Sismológicas (Venezuela)

Elidia Beatriz Blázquez Parra

Universidad de Málaga
(España)

Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza

Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Brasil)

Elódio Sebem

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina (Brasil)

Enrique Priego de los Santos

Universidad Politécnica de Valencia
(España)

Francisco Javier Ariza López

Universidad de Jaén
(España)

Fernando Luiz de Paula Santil

Universidade Federal de Uberlândia
(Brasil)

Gerardo Bocco Verdinelli

Universidad Nacional Autónoma de México
(México)

Giovana Mira de Espindola

Universidade Federal do Piauí
(Brasil)

Guillermo Martínez Pastur

CADIC CONICET
(Argentina)

Guillermo Realpe R.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador
(Ecuador)

Isabel Avendaño Flores

Universidad de Costa Rica
(Costa Rica)

José Juan de Sanjosé Blasco

Universidad de Extremadura
(España)

José Julio Zancajo Jimeno

Universidad de Salamanca
(España)

José Miguel Santos Preciados

Universidad Nacional de Educación a Distancia
(España)

Jorge Espinoza Nanjari
Universidad Tecnológica Metropolitana
(Chile)

Juan Gregorio Rejas Ayuga
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Juan José Neiff
Universidad Nacional del Nordeste
(Argentina)

Julia Celia Mercedes Strauch
Escola Nacional de Ciências Estatísticas
(Brasil)

Manuel Trejo Soto
Universidad Autónoma de Sinaloa
(México)

Marcio Augusto Reolon Schmidt
Universidade Federal de Uberlândia
(Brasil)

María de Gracia Rodríguez Caderot
Universidad Complutense de Madrid
(España)

María Jesús Vidal Domínguez
Universidad Autónoma de Madrid
(España)

Marvin Alfaro Sánchez
Universidad Nacional de Costa Rica
(Costa Rica)

Miguel Ángel Bernabé
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Miguel Ángel Giraut
Universidad de Buenos Aires
(Argentina)

Miguel Ángel Manso
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Oswaldo Padilla Almeida
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE
(Ecuador)

Pilar García Rodríguez
Universidad Complutense de Madrid
(España)

Rafael Cruz Iglesias
Unidad Científica Técnica GEOCUBA
(Cuba)

Raquel M. Capilla Romá
Instituto Cartográfico Valenciano
(España)

Rosa Cañada Torrecilla
Universidad Autónoma de Madrid
(España)

Sebastián Patricio Dueñas Oviedo
Universidad de las Américas
(Ecuador)

Sandra Cavallaro
SEGEMAR-CONICET
(Argentina)

Sandra Villacorta
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Teresa Iturrioz Aguirre
Universidad Politécnica de Madrid
(España)

Wagner Carrupt Machado
Universidade Federal de Uberlândia
(Brasil)

Nota Editorial

Si el lector realiza un repaso al Índice que ofrece el número 98 de la *Revista Cartográfica* (enero-junio 2019), encontrará un total de catorce artículos, que abordan distintos problemas a los que los autores dan respuesta mediante la utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) para modelar, predecir, procesar y analizar la información geoespacial.

Los artículos de este número que aportan al campo de la Geodesia, hacen referencia desde la utilización de los actuales sistemas de observación de la Tierra para discriminar los movimientos de la corteza en relación al nivel del mar, hasta el desarrollo de una metodología alternativa para predicciones de altitudes normales-ortométricas.

Diversos artículos abordan la utilización de la Cartografía en distintos campos de aplicación y temáticas distintas. Se presentan artículos sobre exactitud de la cartografía catastral, experiencias cognitivas para la interpretación de un mapa dasimétrico, estudio de mapas históricos para comprender el desarrollo de una ciudad y el avance de la urbanización, entre otros.

Las TIG son las “protagonistas” del mayor número de artículos que se ofrecen en este número: LiDAR para la estimación de densidades de carbono sobre el suelo; Teledetección para el estudio de incendios forestales y vertidos de detritos en un río utilizando imágenes satelitales. Una mención aparte requieren los Sistemas de Información Geográfica, que en algunos estudios se complementan con técnicas de percepción remota, mientras que otros son utilizados para modelar escenarios de desastres naturales e impacto sobre la población, estudios de accesibilidad peatonal, avance de especies peligrosas, etc. Estos estudios de referencia son los que servirán de soporte para la toma de decisiones y para la implementación de políticas de ordenamiento territorial. Por último, completa este número un artículo relacionado con la calidad de las bases de datos geoespaciales.

Esperamos que la variedad de temáticas y problemáticas que se abordan en los artículos que ofrece el número 98, resulten una gran contribución a la docencia e investigación y de alguna manera despierte el interés de estudiantes, docentes e investigadores para ampliar o generar nuevas líneas de investigación.

Agradecemos a los autores sus contribuciones, y a los revisores/evaluadores de los artículos que han participado en este número y que contribuyen a mejorar la calidad de la Revista. Sin más preámbulos, esperamos que disfruten la lectura.

María Ester Gonzalez
Editora

Editorial

If the reader takes a look at the Index of edition number 98 of the *Cartography Magazine* (January-June 2019), he will find a total of fourteen articles, addressing different problems which authors give solution to using Geographic Information Technologies (GIT) for modeling, predicting, processing and analyzing geospatial information.

The articles in this edition that contribute to the field of Geodesy range from the use of the current systems for Earth observation to differentiate crustal movements relative to sea level, to the development of an alternate methodology for prediction of normal-orthometric altitudes.

Some articles address the use of Cartography in different topics and fields of application. They deal with the accuracy of cadastral cartography, cognitive experiences for the interpretation of dasymetric maps, the study of historical maps to understand the development of cities and the progress of urbanization, among other subjects.

ITs are the main topic of the greatest number of articles included in this edition: LiDAR for the estimation of carbon densities on the ground, and Teledetection using satellite images for the study of forest fires and detritus spills in rivers. Also noteworthy are the Geographic Information Systems (GIS), which are complemented with remote perception techniques in some studies, while others are used to model scenarios of natural disasters and their impact on population, pedestrian accessibility studies, advance of dangerous species, etc. These reference studies will serve as a support for making decisions and for the implementation of land management policies. Finally, this edition is completed with an article related to the quality of geospatial databases.

We hope that the variety of topics and problems addressed in the articles included in edition number 98 make a meaningful contribution to teaching and research and stimulate the interest of students, teachers and researchers in increasing or creating new research lines.

We express our thanks to the authors for their contributions and to the reviewers/evaluators of the articles who have participated in this edition and contribute to enhance the quality of the magazine. We hope you enjoy the reading.

María Ester Gonzalez
Editor

Editorial

Ao fazer uma leitura do índice que oferece o número 98 da *Revista Cartográfica* (janeiro-junho 2019), o leitor encontrará um total de quatorze artigos, que abordam distintos problemas que os autores dão resposta mediante a utilização das Tecnologias da Informação Geográfica (TIG) para modelar, prever, processar e analisar a informação geoespacial.

Os artigos deste número relacionados ao campo da Geodésia, fazem referência a partir do uso de sistemas atuais de observação da terra para discriminar os movimentos da crosta em relação ao nível do mar, até o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para previsões de altitudes normais-ortométricas.

Diversos artigos abordam a utilização da Cartografia em distintos campos de aplicação e temáticas distintas. Se apresentam artigos sobre exatidão da cartografia cadastral, experiências cognitivas para a interpretação de um mapa dasimétrico, estudo de mapas históricos para compreender o desenvolvimento de uma cidade e o avanço da urbanização, entre outros.

As TIG são as “protagonistas” do maior número de artigos que se oferece neste número: LiDAR para a estimação de densidades de carbono sobre o solo; sensoriamento remoto para o estudo de incêndios florestais e descarga de detritos em um rio utilizando imagens de satélites. Uma menção separada requer os Sistemas de Informação Geográfica, que em alguns estudos se complementam com técnicas de percepção remota, enquanto que outros são utilizados para modelar cenários de desastres naturais e impacto sobre a população, estudos de acessibilidade de pedestres, avanço de espécies perigosas, etc. Estes estudos de referência são os que servirão de suporte para a tomada de decisões e para a implementação de políticas de ordenamento territorial. Por último, completa este número um artigo relacionado com a qualidade das bases de dados geoespaciais.

Esperamos que a variedade de temáticas e problemáticas que se abordam nos artigos oferecidos no número 98, resulte numa grande contribuição ao ensino e pesquisa e, de alguma maneira, desperte o interesse de estudantes, professores e pesquisadores, em expandir ou gerar novas linhas de pesquisa.

Agradecemos aos autores suas contribuições, e aos revisores/avaliadores dos artigos que participaram deste número que contribuem para melhorar a qualidade da revista. Sem mais preâmbulos, esperamos que desfrutem a leitura.

María Ester Gonzalez
Editora

ARTÍCULOS
científicos



Admissible relative errors of the parcel area of a land parcel map base created as a synthesis of individual survey maps

Andrea Barbieri*
Carlos López-Vázquez**

Received January 15, 2018; accepted July 21, 2018

Abstract

Today the land parcel map of Uruguay is available as an updated, integrated legacy digital cadastre which planimetric accuracy is not enough to assure geometric interoperability. The creation of a brand new land parcel map is being considered with a procedure yet to be defined but in any case subject to reasonable goals in terms of geometric accuracy. In this paper we have tested a direct procedure in which each parcel is joined to its immediate neighbors until a block is formed. In Uruguay such block will grow until a road, river or similar object is found. The block is manually inserted within the road network, which has absolute coordinates. The rural survey maps (approx. 250 000) are already scanned but they need to be vectorized and edited through scaling, rotation and manual matching to its neighbors. GNSS tracks for roads and highways are available for the whole country, so we could fit the block within them in order to properly register it. The resulting geometric accuracy was evaluated in terms of the relative error in area, which has a normal distribution with a mean 0.10% and a standard deviation 3.51%, leaving 82.0% of the parcels with relative area error less than 5%. The planimetric error, crucial to assure interoperability, was 53.79 m at the 95% confidence level.

* Programa PEDECIBA Geociencias, Uruguay, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5675-0095>, correo electrónico: abarbierid@gmail.com

** Laboratorio LatinGEO IGM+ORT, Facultad de Ingeniería, Universidad ORT, Uruguay, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8444-1510>, correos electrónicos: carloslopez@uni.ort.edu.uy; carlos.lopez@ieee.org

Key words: *Land parcel map, Survey maps, Geometric Interoperability, Positional Accuracy Improvement.*

Resumen

Actualmente en Uruguay la cartografía base catastral está dada por un parcelario digital integrado y actualizado pero cuyas características geométricas no son adecuadas para que sea interoperable con otras capas de información de alta exactitud. Se está considerando generar una nueva cartografía, para lo que hay que especificar metodología y requerimientos, determinando la exactitud geométrica que es posible y razonable alcanzar para posteriormente exigirla a la hora de la contratación de dicho trabajo. En este trabajo se ensayó el procedimiento de agregar cada parcela con la(s) parcela(s) lindera(s) formando una unidad. Como en Uruguay las áreas públicas no disponen de mensura, el proceso de unión se interrumpe al llegar a una ruta, un curso de agua, etc. Los planos de mensura rurales (del orden de 250 000) están digitalizados pero no vectorizados, por lo cual tras hacerlo se realizó un trabajo de escalado, rotación y eventualmente deformación para luego integrarlo con sus vecinos. Para las rutas y caminos públicos se dispone de trazas GNSS, lo que permitió darle a cada bloque coordenadas absolutas. La exactitud de la cartografía resultante se valoró en términos del error relativo del área de cada parcela, resultando que el error cometido es de distribución normal, con media 0.10% y desviación estándar 3.51%, dejando así al 82.0% de las parcelas con menos del 5% de error. En términos de error planimétrico, crucial para asegurar la interoperabilidad, el mismo fue de 53.79 m al 95% de nivel de confianza.

Palabras clave: *Cartografía catastral, Planos de mensura, Interoperabilidad geométrica, Mejora de Exactitud Posicional.*

Resumo

Atualmente no Uruguai a cartografia base cadastral é um parcelário digital integrado e atualizado mas cujas características geométricas não são adequadas para que seja interoperável com outras camadas de informação de alta exatidão. Se está considerando gerar uma nova cartografia, com metodologia e requerimentos a serem definidos, com metas de exatidade geométrica razoáveis a serem alcançadas para posteriormente serem exigidas na hora da contratação de um trabalho. Neste artigo testou-se um procedimento direto no qual cada parcela é unida a seus vizinhos imediatos até que um bloco seja formado. No Uruguai, esse bloco crescerá até que uma estrada, rio ou objeto semelhante seja encontrado. O bloco é inserido manualmente dentro da rede rodoviária, que possui coordenadas absolutas. Os mapas rurais (da ordem de 250 000) estão digitalizados mas não vectorizados, por isso se realizou um trabalho em escalonamento, rotação e eventualmente ajuste para integrá-los com seus vizinhos. Para as rotas e caminhos públicos se dispõe de traços de GNSS, o

que permitiu dar a cada bloco coordenadas absolutas. A exatidão da cartografia resultante foi avaliada em termos de erro relativo da área de cada parcela, resultando que o erro cometido é de distribuição normal, com média 0.10% e desvio padrão de 3.51%, deixando assim 82.0% das parcelas com menos de 5% de erro. Em termos de erro planimétrico, crucial para assegurar a interoperabilidade, o mesmo foi de 53.79 m para 95% de nível de confiança.

Palavras chave: *Cartografia cadastral, Planos de medição, Interoperabilidade geométrica, Melhora de Exatidão Posicional.*

Introduction

Today Uruguay has an updated, legacy land parcel map under the administration of a single governmental body (National Cadastral Directorate, *Dirección Nacional de Catastro*, DNC hereinafter) which covers all the country. According to its effects in civil law, the Uruguayan Cadastre is demonstrative because its information is deemed as true and valid, but not necessarily static. In the situation that a mistake is found it is still possible to modify it. The Uruguayan Cadastre is exhaustive, covers all the territory and holds survey maps for all public or private owners. However, it does not include public roads, highways, parks, etc., because they do not have a parcel number.

The Cadastral information is used as a base for tax computations through the property value. In addition it has legal effects, because the owner of each parcel is recorded. The physical characteristics of the parcel are recorded in a survey map, always made by professional surveyors. Although it does not have absolute coordinates it is deemed to be very accurate in terms of its geometry.

The Decree 318/995 states that the survey map is the base for the correct identification of the parcel in the ground while provides legal evidence for its dimensions (in particular its area). The area value on principle is used for tax computations, property values, etc. so its accuracy is taken for granted. Its numerical value arises directly from the computations made using field measurements by the surveyor, and not from the polygon represented in the survey map.

Today DNC organizes the land parcel map base in two sets: one urban and another rural. The original rural land parcel map was built over polyester through a photo mosaic of 1:20 000 nominal scale derived from the 1966's aerial campaign at scale 1:40 000. The photo mosaic was complemented with some partial land parcel map already existing and individual survey maps when needed. In 1998 a vectorization was performed through an agreement between DNC and the National Directorate of Mining and Geology (*Dirección Nacional de Minería y Geología*, DINAMIGE) using the local reference system ROU-USAMS. In 2006 a change of

projection was performed, using the global reference WGS84, UTM Zone 21 South through a new agreement between DNC and the Minister of Cattle, Agriculture and Fishing (*Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca*, MGAP). After this short summary, it can be stated that the Uruguayan Cadastre is a mixed one, considering that in its creation took part DNC as well as external bodies. For the sake of this paper, its most significant feature is that it has been derived from a photo mosaic and not from the survey maps themselves.

According to Faure Valbi *et al.*, (2010) and Barreto *et al.*, (2010) the resulting land parcel map has a planimetric accuracy at the 95% confidence level of the order of 200 meters. Such value is deemed too large if one wants to assure interoperability with other cartographies, so an update (using a methodology yet to be defined) is being considered. In this work we will analyze the use of the individual survey maps as the starting point, together with GNSS tracks of the public roads both already available in digital form for the whole country. Afterwards we could experimentally establish the achievable error levels, either considering the planimetry, parcel areas and/or parcel length borders. Such error values might be used as reference for a bidding process if this procedure is selected. Conversely, they can be considered before to either choose or discard the procedure as a whole.

This paper is organized in seven sections. In the next one we will discuss the State of the Art, afterwards the Data and Methods will be described and we will devote a section to analyze the Problems encountered. Then we will present the Results, develop the Conclusions and finally the References will be listed at the end.

State of the Art

Building a land parcel map is not a new topic. The main motivation for having a land parcel map was the proper definition of taxes and audits, but as time passed new roles have been assigned. Such roles are formulated in initiatives like the National Spatial Data Infrastructures (NSDI) which intends to offer to the government and the general public trustable geographic information, updated and interoperable. This paper is devoted to the last requirement. The surge of NSDI applications made clear that today a significant geometric accuracy update is mandatory if the interoperability requirement is to be met. There is no single way to achieve that; a new dataset could be created from scratch or the existing one could be modified. The principal alternatives might be organized according to the reference used: manually generate it from scratch using an orthoimage as reference (Sandoval, 2004; Balado and López-Vázquez, 2020), apply a mathematical transformation to the legacy land parcel map (Siriba *et al.*, 2012) or even the use of information without geographic reference (Hesse *et al.*, 1990; Tamim, 1992; Tong *et al.*, 2009; Sisman, 2014;

Cvijetinovic *et al.*, 2015). We have restricted the list to those papers that considered also the accuracy in terms of area.

Sandoval (2004), presented a comparison between a soil cartography at scale 1:50.000 created with a simple photogrammetric procedure and another build as a reference one created with a digital photogrammetric procedure. The differences were presented as absolute values, despite that they stated a relative error in area below 5% while the planimetric error computed from 150 control points was 68 m. Unfortunately no results at the parcel level were reported but only those at land use classes.

Balado and López-Vázquez (2020) did something similar extracting the apparent cadastre from an orthoimage of 0.50 m resolution, 3.2 m planimetric accuracy according to the National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA hereinafter) (FGDC, 1998). They edited an existing legacy digital cadastre in order to fit it to the image. The relative error for the parcel areas (defined in eq. 1) was proved to have a normal distribution, with mean value -1.72% and standard deviation 8.59%. Such figures should be compared with the values for the legacy cadastre, with a mean value of -0.66% and standard deviation of 11.25%. According to Uruguayan regulations, while comparing to the existing land base information a new survey map should be rejected for further analysis if its relative discrepancy in area exceeds 5%. Using the legacy digital cartography, only 39.3% of the survey maps met such requirement, while after the fit with the orthoimage the modified land parcel base accepts 49.7%.

Siriba, *et al.*, (2012) uses for the task both a low accuracy, legacy land parcel map as well as GNSS road tracks, reliable and more accurate. From the former they extract the implicit roads, which are processed to fit to the latter through a spline transformation. To evaluate the resulting accuracy a high resolution orthoimage was used as a reference. Due to some difficulties to identify all the parcel boundaries they grouped them in blocks until the block borders were crisp. They report an improvement (not precisely described) in terms of the areas of 92.8%, but they not disclosed the reference source neither provide figures at the parcel level. The procedure has some contact points to the one to be applied here.

Hesse *et al.* (1990) compared different techniques used to register scanned maps, from the simplest (rotations, translations, affine transformations, etc.) to more sophisticated ones that considered keeping angles between segments or the declared area of the parcel. They summarized their results in terms of the relative error of the area as well as absolute planar coordinates in a (possibly urban) test case. They concluded that adding the areas or the angles as a restriction offered a significant improvement, but not necessarily both at the same time.

Starting from the survey maps as well, Tamim (1992) did something similar to what is reported here. However, in his case he could not assume that the parcel

areas were very accurate. After joining together the parcels in a block, he proposed to adjust the corners of the parcels by imposing restrictions, such that all fronts are aligned, right angles are preserved, continuity of the tangents at curved limits are enforced, etc. as well as the parcel area and also control points if they are available. After adding weight coefficients to each restriction the problem can be stated as one of nonlinear least squares. A linearized approximation is used in order to solve it, and a simple case is presented as an example. Unfortunately, this pioneering work has had very little impact on the literature.

Tong *et al.* (2009) described a complete automatic survey map adjustment procedure considering at the same time the position error as well as area discrepancy, and taking into consideration other restrictions like parallelism between fronts, right angles, etc. The process can be applied to a single survey map or a block. The solution requires to assemble a non-linear system of equations describing area restrictions, points alignment, angles, etc., to derive a first order approximation (i.e. linearize it) and solve the resulting problem through the normal equations. Like the present paper, their work also deals with blocks but of urban areas. In their example the streets are also parcels. The initial relative errors are of the order of a few per cent, but for some small parcel they can exceed 10%.

Sisman (2014) compared different techniques to establish the parameters of the affine transformation to a given map including the Total Least Squares procedure. As a byproduct the author presented the relative error of the parcel areas in a test case, which was below 5%.

Cvijetinovic *et al.* (2015) also followed a process of synthesis of the land parcel map base starting with survey maps. After comparing the areas derived from field notes with the vectorized one, they found that 94% of the cases the agreement is better than the 1%.

The goal of this paper is to establish realistic achievable values of attainable accuracy using a particular procedure. There are, however, general criteria which might be worth to consider. Thapa and Bossler (1992) described the typical error values of geographic information, with emphasis in those that arise after capturing the data through secondary processing. After considering drawing errors, heat and humidity dilation and contraction of the media, scanning, vectorization, etc. they conclude that it is reasonable to expect an error between 0.5 and 0.81 mm at the map scale. For the case we have at hand (land parcel map at nominal scale of 1:40.000) such criteria will establish a lower bound of 20 to 32 m. Notice that such criteria presumes that the original information was on analogous media.

Some Cadastral Agencies specify admissibility criteria in order to accept a new survey map in the system. The Catamarca province Cadastral Agency (Argentina) states tolerances in terms of side length, with different values for urban, suburban or rural areas (Resolution 276-2013). In the same country, the Santa Fe province Ca-

dastre establishes a similar criteria but expressing the limits in absolute value, ranging from 0.08 m in urban parcels, 0.15 m at suburban and 0.5 m in rural ones (Cap. XIII, Art. 155 of Provincial Decree 1309/2017). The Brazilian technical norm (INCRA, 2013) only establishes absolute tolerances for the rural case, varying from 0.50 m to 7.50 according to the difficulty for accessing the field point. Boey (1999) summarizes the requirements of the time for Australian states in term of angles, length or locations. For the latter it specifies tolerances of the order of 0.15 m. For lengths they prescribed a model $A+Bx\text{ppm}$, with A of the order of 1 cm and B up to 100 ppm. In any case such limits are well below the achievable values according to Thapa and Bossler (1992). It should be mentioned that those countries have a much bigger scale of cadastral maps (e.g. Australia between 1:1 000 and 1:5 000, in Argentina between 1:1 000 and 1:5 000 in urban areas), which justifies somewhat the need of basic information of higher accuracy.

In Uruguay the Resolution 24/996 (1996) states allowable limits to the geometric discrepancy between the new survey maps and the already registered ones. In particular, parcel area might differ up to 5% and parcel side lengths up to something between 2 and 5%, being the larger value for natural limits. There are no provisions for absolute coordinates. A similar criteria is applied in Malaysia (Jeffri *et al.*, 2017) but varying the limit: 5% for up to 40 ha, 2% for parcel between 40 and 200 ha and no more than 1% for parcel larger than 200 ha.

With regard with parcel side lengths, the Uruguayan criteria might be regarded as less strict than in other places. For any rural parcel with one border of more than 25 m, the Uruguayan criteria will accept differences larger than 0.5 m, which in turn is the maximum allowable in Catamarca or Santa Fe. It is not easy to relate the tolerances in area with those of length or position (Chrisman and Yandell, 1988) so we will not compare the regulations in those terms. Finally, and only since 1995, in Uruguay all the new survey maps must include a table with the coordinates of all the vertex of the parcel in an orthogonal, local, arbitrary system, which might obviate the digitalization errors in future digitalization works.

Data and Methods

This work was motivated by a procedure proposed to the second author by Ing. Agrim. F. Barbato (Barbato, 2014) who suggested to interpret each parcel as a unique and specific entity in the land parcel map, which after joining with its neighbors will belong to a unit. The process will first require a scanning from the original polyester survey map followed by a vectorization of the image plus setting a proper scale. Afterwards, the parcel will be merged and (if deemed necessary) adjusted with neighbors parcels in order to form a block. Finally the unit will be rotated and translated in order to fit within the road network, defined with absolute coordinates. After this quick introduction we will present the details.

Since in Uruguay the public areas are not recorded in the land parcel map, the joining process between parcels will stop at roads, rivers, etc., as happens in other countries (Tamim, 1992; Siriba *et al.*, 2012). In this work we will denote as “block” the simply connected set of parcels which share at least one border with the others and which external limit is either a road, a river, or an international boundary. The rural survey maps (nearly 250 000 in Uruguay) are scanned but not vectorized, a task that was carried out in this project for the study zone. Because they do not have absolute coordinates we will register it to a network of GNSS road and highways tracks, available for the whole country.

The abovementioned vectorization was not automatic, so each parcel was scaled, rotated and eventually slightly adjusted in order to fit with its neighbors. The scale of the survey map was defined considering at least one length dimension explicitly stated in the document (usually the largest available). Afterwards, in the CAD environment, it was fairly easy to compute the area of the resulting polygon, and the discrepancy against the declared area (supplied by the surveyor and deemed exact) provided a first measure of geometric accuracy.

This pilot test used the images of the survey maps stored at the Topography Directorate of the Ministry of Transportation and Public Works (*Dirección Nacional de Topografía del Ministerio de Transporte y Obras Públicas*). They were produced after microfilming the original polyester survey map and scanning later from the microfilm. As interim information we used the legacy land parcel map of the Canelones county available from DNC. The GNSS tracks for such county was generated by the UNA-ONU project (2009) and downloaded from the NSDI of Uruguay. We want to report the accuracy not only in area terms, but also in planimetry. To provide absolute reference for the planimetric error an orthoimage of 0.50 m resolution, 3.2 m accuracy at the 95% confidence level was provided by the Military Geographic Institute (IGM) through its Open Data Initiative.

To have a small but representative test case we selected a block bounded by roads with as many parcels as possible and with survey maps available, all within the region covered by the orthoimage. The selected study area of 19 km² belongs to the rural area of the Canelones county, and is located between the Solís Grande and Solís Chico rivers, as sketched in Figure 1. It is composed of 74 parcels, with varying sizes between 0.9 and 138.3 ha.

As a first step we located and downloaded the images of each of the survey maps. The second step was to vectorize the parcel boundaries using a CAD tool as presented in Figure 2. We used a scale factor defined by a single segment of the image with stated length. Finally, after closing the polygon, the area value (denoted as Vectorized Area hereinafter) was computed. When the border lengths were available we also recorded both, at image and at the polygon, for further processing. Once the survey maps were vectorized we proceed to assemble all of them in a similar process than to form a puzzle, joining the parcels with its neighbors using just rotation and translation tools. When the borders did not fit, we performed a small manual edition trying not to disturb the rest of the geometry. Thus, the puzzle

assembling was not achieved strictly through pure isometric transformations. Unlike others did (Tamim, 1992; Tong *et al.*, 2005; 2009; Siriba *et al.*, 2012, etc.) all the process was manual. In Figure 3 the final product is shown.

After that, we exported this block from AutoCAD 2010 *.dwg format to a GIS ArcMap 10.3, where the GNSS tracks were available. Once represented together, we manually registered the block fitting it within the envelope of the GNSS tracks thus giving absolute coordinates to the dataset.

The planimetric quality control required the use of the orthoimage, which was used as a reference. We selected those corners of the parcels that were easily identifiable in the image, and we measure and store its coordinates in the image, in the new land parcel map and in the legacy one. Such values were used for the NSSDA computations.

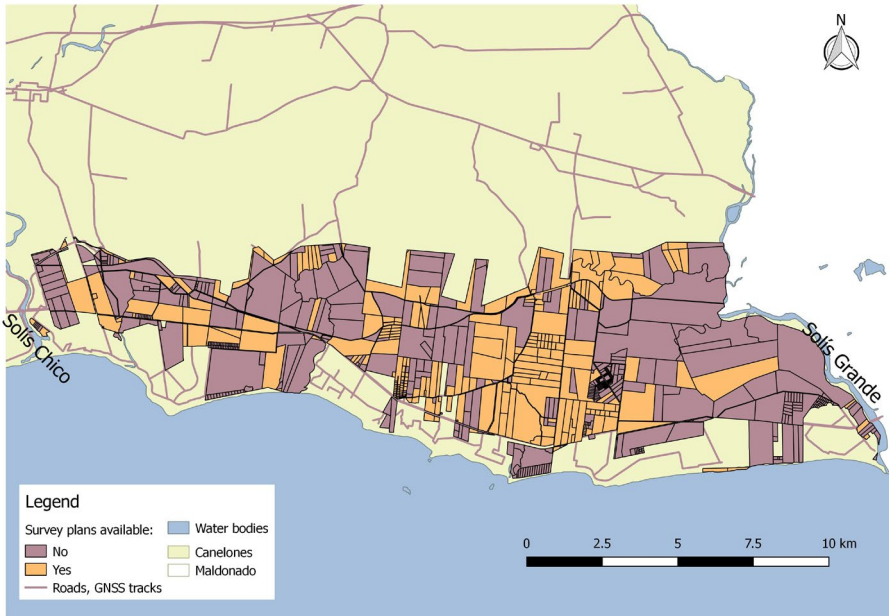


Figure 1. Location of the test zone.
Source: own elaboration.

For the area computations we adopted as a reference the value declared by the surveyor, number which is both mentioned in the image as text and stored as attribute in the database. We disregarded any correction of the computed areas due to the cartographic projection, a decision that will be justified later. We analyzed each step of the process and computed the relative error of the intermediate areas for

each. Taken into consideration the highly variable parcel areas, we used the relative error as the relevant metric. Such value is defined in (1); notice that it has a sign.

$$e = \frac{(\text{computed_area} - \text{declared_area})}{\text{declared_area}} * 100 \quad (1)$$



Figure 2. Illustrating the vectorization process. Notice that the declared area is explicitly mentioned (with text) in the survey map, as well as some lengths close to the parcel boundaries.

Source: own elaboration.

In summary, and in terms of parcel areas, there are three relative errors considered in this paper. After the first vectorization plus scaling of each parcel we can compare the computed area to the declared one. To evaluate the block assembling process we have the final land parcel map to use. Since the legacy one is also available, we computed its relative error as well. When data was available, we also computed the relative discrepancies in terms of the length of the parcel boundaries. Finally, we performed the standard planimetric accuracy computation using the orthoimage as a reference. It should be stressed that no field work was needed for this paper.

Problems encountered

In some parcels there were large discrepancies between the land parcel map and its survey map. One possible explanation is missing data updates like, for example, some subdivision or fusion of the parcel that was not recorded in the dataset. There might be some other reasons which we could safely assume that are not related with the geometry neither with the vectorization process. So, to have more reliable conclusions, we arbitrarily remove from consideration those cases of parcels which exceed 25% the relative error of the area. The remaining population has 64 parcels, with a relative error that follows a normal distribution according to the Kolmogorov test. On principle we could estimate raw averages and sample standard deviation to estimate its parameters. However, since we suspect that there are still some extra outliers present, we applied the MCD procedure (Rousseeuw and van Zomeren, 1990) which renders values equivalent to the traditional estimate of the first and second moments of the distribution (namely, mean and standard deviation) but immune to the existence of outliers. As a byproduct it generates a reliable Inlier/Outlier classification. Afterwards the parameters of the normal distribution (mean and standard deviation) were computed using the Inlier subsample, and they are the ones to be presented here.

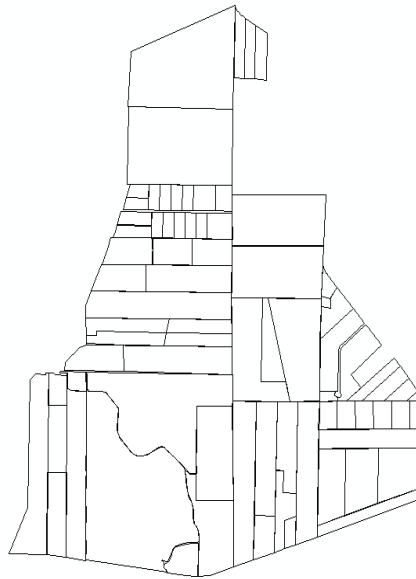


Figure 3. Sketch of the final block.
Source: own elaboration.

Some practical problems to be described now here might not be significant elsewhere, but we feel that they should be mentioned. At the moment of downloading the survey maps some issues appeared, like having the same parcel number attributed to two different parcels, or realizing that some parcel had changed its number without clear notice. To solve the first issue, the DNC's geoportal proved to be a valid tool because it shows the survey map using its number. For the second case we had to dig into earlier survey maps looking in the image itself and then try to find either the owner or the old parcel number. However, despite our efforts some cases could not be resolved.

Due to this fact we were unable to include all the parcels and to perform the area computations as originally planned. In addition, no second block could be found within the region covered by the orthoimage, so we have had no other choice than to continue despite the holes.

Despite the survey maps had a printed scale, its usefulness is somewhat doubtful because we could not discern the original size of the polyester media after the scanning process. That is the reason behind the use a de-facto scaling with an explicit length visible in the survey map image.

As soon as we started forming the puzzle we noticed that the parcels do not fit always exactly with its neighbors. There were cases of slight overlapping and also of interstices, so small adjustments were carried out in order to properly share the boundaries. Through a purely subjective process, we altered only the minimum number of corners in order to keep as much as possible other dimensions of the parcel.

We are aware that there exist more sophisticated and objective approaches to fit a puzzle while keeping the area values, like those presented by Hesse *et al.* (1990); Tamim (1992); Tong *et al.*, (2005), and Tong *et al.*, (2009). However, their code was not readily available for our project. Due to the time and resources restrictions and considering our goal, we were satisfied by just applying manually some minor adjustments.

Results

Relative error of parcel area and lengths

After building the puzzle and giving global coordinates to the block we have got the proposed cartography as depicted by Figure 3. Then we computed the final area of each parcel, and once the outliers were considered, we fitted the inliers to a normal distribution. The inliers average was 0.10% while its standard deviation was 3.51%. The legacy land parcel map showed that the inliers also belong to a normal distribution with average -4.68 % and standard deviation 8.24% (see Table 1). Notice the drastic reduction (to less than a half) of the standard deviation and also the clear bias reduction, but also notice that the final values are still somewhat large.

The land parcel map accuracy is usually reported in terms of its planimetric accuracy. Its value is expected to diminish after a cartographic improvement process. In the specific case of Uruguay, the DNC rules provide another indirect metric to quantify the improvement. According with the rules of Resolution 24/996 a new survey map that differs with the prior information more than 5% in the relative error of its area will require further explanations. To simplify the situation let's assume that the already existing survey maps are presented again to DNC. After comparing against the current land parcel map it can be seen that some of them will be accepted and some rejected. In our dataset only 17 parcels (39.5% of the 43 declared as Inliers) could be accepted. Even though our test is based in a very small sample, this acceptance rate is comparable with the one for the whole rural Uruguay (nearly 250.000 parcels) which accounts for 35.5%. After building the proposed cadastre with our procedure, the number of acceptable parcels grows up to 41 (82.0 % of the 50 Inliers), which is deemed as an important improvement yet still far from the ideal case that should accept 100%. If instead of areas we consider the acceptance criteria for the relative error of lengths (bounded by 2% in Uruguay) the improvement of the process is still more dramatic: in the legacy land parcel map base just 1 out of 14 parcels can be accepted (7.1%), while in the proposed one we can accept 7 (17.9% of a set of 39 inliers) (see Table 2). In this case we defined as inlier any parcel which maximum relative error in side length was below 10%.

Table 1
Results in terms of parcel area relative error using the MCD criteria to classify the Inliers

<i>Stage</i>	<i>Inliers</i>	<i>Average</i>	<i>Standard deviation</i>	<i><5%</i>
Present cadastre	43	-4.68	8.24	39.5
After vectorization	50	0.28	2.55	92.0
Proposed cadastre	50	0.10	3.51	82.0

Source: own elaboration.

It is worth mentioning that, in the case of the parcel lengths, the dataset is very irregular. Some of the survey maps lacks from explicit information on some lengths, or it simply missing at all, because such information has been mandatory only after 1995. This was not the situation with the declared parcel area, which has been always required. Thus, and considering also the small sample, great care

should be taken at interpreting our results in terms of side length. The finding of a positive correlation between the improvement in area and length is consistent with the results of Hesse *et al.* (1990).

Table 2
Results in terms of the length relative errors using
the 10% upper limit to define the Inliers

<i>Stage</i>	<i>Inliers</i>	<i>median (%)</i>	<i>quartil 75%</i>	<i><2%</i>
Present cadastre	14	15.0	24.2	7.1
After vectorization	41	3.1	5.4	29.3
Proposed cadastre	39	4.4	8.2	17.9

Source: own elaboration.

Planimetric accuracy

The main motivation to update the land parcel map was directly related with this metric. Despite the present regulations of DNC in Uruguay do not prescribe any accuracy for the absolute coordinates there exist others that do, so it is fit to quantify it. We used a high resolution orthoimage supplied by IGM to identify corners of the parcels in the image used as true values. Following Siriba *et al.* (2012) we collected also its coordinates in both present and proposed land parcel map (see Table 3 and Figure 4).

As a widely accepted and objective test of accuracy we applied the NSSDA standard (FGDC, 1998) using a set of 34 corners either in the border or interior to the block. On a case by case basis, and always following the standard, some outliers were detected and removed for the computations. The result of the planimetric error to the 95% level of confidence was 276.1 m for the legacy land parcel map. It is a value comparable with the ones reported by Barreto *et al.* (2010) or by Faure Valbi *et al.* (2010) (namely, 200 m) but not as low as the one reported by López-Vázquez, (2014) of 136 m. For the proposed cadastre the result was 53.8 m. It should be stressed that the accuracy of the orthoimage was 3.2 m, so according to FGDC (1998) it can be used as a reference source of higher accuracy.

Table 3
Coordinates of control points in the orthoimage, original cadastre (CDP) and proposed cadastre (puzzle). We highlight the components of those points which were later classified as outliers and removed from calculations

<i>Point</i>	<i>X (ortho)</i>	<i>Y (ortho)</i>	<i>X (CDP)</i>	<i>Y (CDP)</i>	<i>X (puzzle)</i>	<i>Y (puzzle)</i>
a	635464.25	6154666.90	635547.82	6154511.00	635453.00	6154649.54
b	636620.41	6154944.90	636690.89	6154788.79	636614.24	6154978.88
c	637579.20	6154102.84	637659.15	6153959.76	637596.01	6154070.73
d	637340.38	6152374.56	637433.36	6152237.63	637290.79	6152368.49
e	638202.22	6150992.02	638330.35	6150882.92	638208.67	6151016.20
f	638066.98	6150001.82	638223.62	6150012.61	638099.37	6150025.24
g	635598.80	6149548.56	635719.44	6149485.10	635639.95	6149531.11
h	633866.30	6149976.21	633970.63	6149934.62	633626.76	6149966.96
i	634115.18	6150397.70	634165.63	6150302.03	633883.22	6150391.19
j	634240.53	6151623.50	634286.73	6151537.70	634035.54	6151617.19
k	634693.10	6151875.21	634814.25	6151823.01	634675.56	6151904.14
l	634744.34	6152273.32	634847.09	6152223.26	634733.70	6152316.96
m	635301.50	6153447.01	635398.21	6153233.14	635273.46	6153386.72
0	636213.69	6151180.06	636339.71	6151053.77	636182.88	6151177.64
1	636200.68	6151139.74	636318.93	6151045.77	636178.26	6151133.20
2	636290.74	6151943.81	636397.95	6151853.74	636260.44	6151959.81
3	636380.80	6152674.28	636485.80	6152527.62	636337.56	6152665.05
4	636433.90	6153156.58	636539.62	6152999.42	636391.44	6153159.23
5	636517.58	6153962.51	636606.45	6153828.03	636483.57	6153981.10
6	636892.60	6154144.47	636998.43	6153997.33	636876.04	6154222.94
7	637054.26	6154124.10	637268.91	6153961.10	637199.88	6154130.21
8	636404.27	6152976.30	636504.86	6152861.14	636376.24	6153002.60
9	635493.04	6152571.75	635600.35	6152423.70	635466.15	6152583.16
10	635426.05	6152575.19	635600.35	6152423.70	635395.73	6152591.82
11	635587.76	6152039.50	635739.45	6151943.50	635594.72	6152038.67
12	635532.33	6151786.81	635646.91	6151690.92	635501.42	6151789.07
13	634660.76	6151461.01	634736.33	6151373.15	634649.89	6151443.65
14	637563.31	6151020.63	637527.99	6150922.97	637575.08	6151031.55
15	637800.40	6150999.45	637742.63	6150898.42	637804.05	6151009.72
16	637704.73	6150538.84	637850.55	6150464.08	637702.90	6150560.62

Continuated Table 3

17	636953.41	6149875.21	637102.64	6149794.74	636963.20	6149885.51
18	636096.83	6150230.20	636210.52	6150116.17	636089.18	6150223.39
19	635701.44	6150275.45	635816.21	6150152.01	635694.50	6150264.96
20	636325.86	6152181.08	636447.02	6152100.63	636280.08	6152175.72

Source: own elaboration



Legend

- Inner points
 - Outer points
 - Proposed cadastre
- Orthoimage: RGB

0 250 500 1.000 Meters

Figure 4. Proposed cadastre presented on top of the reference orthoimage. We highlight those corners used for the planimetric accuracy evaluation.
Source: own elaboration.

Conclusions

In the context of a NSDI the availability of a geometrically interoperable land parcel map is very important. Where it exists but is not interoperable, it can be considered to modify it thus retaining all the topology information as well as the attributes. If for some reason such option is discarded, the requested land parcel map could be created by a) new field work b) using orthoimagery or c) assembling the individual survey maps like a puzzle. In this work we tested the last option, in order to estimate what accuracy can be achieved with the procedure and use such values eventually in a future bidding process. Unlike the common practice in other countries and considering the rules applicable in Uruguay, we measured the geometric improvement not only in terms of planimetric accuracy but also using the relative error of parcel area as well as lengths included in the survey maps. The consideration of the parcel area as a non-standard metric can be justified by the own goals of the DNC. In Uruguay the parcel area it is not extracted from the geometry of the survey map but explicitly declared by the surveyor after direct computations using field measurements. Its value is deemed to be very accurate.

The disagreement between area computed from the scanned version of the survey map and its declared value was expected to be small, but it was not. The relative error has a normal distribution, with a mean value of 0.20% and 2.55% of standard deviation. We found no conclusive explanation for that, and in any case it is outside the scope of this research. The survey maps were made by different surveyors in different moments and with different instruments and computation techniques, so we believe that there is statistical independence in the area values errors. In Uruguay the field book need not to be stored so there is no practical way to check the computations. Regarding the vectorization step, since 1995 in Uruguay it is mandatory to include in the survey maps a printed table with coordinates of every corner, data which in the future might help avoiding the need of vectorization of polygons going straight to the vector version. In such case the declared area and the computed area are likely to coincide. After more than 20 years with the new rules only 10% of the existing survey maps were produced in the period, thus limiting our options in practice.

There are different ways to quantify the improvement of the proposed new cadastre with respect to the available and somewhat inaccurate one. The relative area error has a normal distribution in both cases, but in the former has a standard deviation of 3.51% which is less than half the one we have now (8.34%), thus showing a substantial drop. However, it cannot decrease further because the baseline using the individual survey maps showed a standard deviation of 2.55%. The conclusion is that the bidding requirements in terms of standard deviation of the relative error of the parcel areas should be higher than 2.55% provided the stored image of the original survey map is used as the base document.

A second measure of geometric accuracy is the planimetric one, which is crucial to assure interoperability with other datasets. There are no Uruguayan regulations to consider. Once we applied the NSSDA standard to quantify it we realize that the new value could be 53.8 m while the present cadastre has an accuracy of 276.1 m, a value consistent with other independent evaluations of the same land parcel map for other regions in the country. Despite a remarkable improvement, the new value is still far of what is required by regional and international standards, thus leading to the conclusion that with this procedure and the available survey maps the intended goal could not be achieved. Absolute accuracy of the product is affected by the accuracy of road centerlines, which are not a well defined part of the parcels neither the block. To improve the former fairly detailed and precise GNSS data of the fences surrounding the block should be used instead of the data available for this test.

Considering the acceptance criteria for new survey maps at DNC, if the current legacy land parcel map is taken as a reference just 39.5% of the original survey maps could be accepted if presented again today. If the proposed adjusted cadastre is used instead, such acceptance rate might grow to 82.0%.

As an innovative characteristic of this work we stress that the accuracy in the parcel areas should be included jointly with other standard planimetric accuracy statements. The parcel area has important roles on its own, both economic and legal.

Acknowledgements

This work could not have been done without the support of the Director and personnel of the Geodesy and Topography Division and the Restitution and Photogrammetry Division of the Military Geographic Institute of Uruguay. We want to mention also the support of Mr. Ing. Agrim. Hebenor Bermúdez, who provided references and valuable advice for the task. We acknowledge the financial support to the first author from the PEDECIBA-Geociencias program.

References

- Balado, I. and López-Vázquez, C. (2020). "Admissible relative errors of the parcel area of a land parcel map base created using an orthoimage as a reference", *Revista Cartográfica*, núm. 100, 15 pp. (Accepted)
- Barbato, F. (2014). Personal communication.
- Barreto, L.; Bermúdez, H.; Blanco, D.; Di Leoni, A.; Faure, J.; Méndez Baillo, R.; Pérez Rodino, R.; Sánchez, M.; Striwe Dieste, E.M. (2010). "Evaluación de la Calidad de la Exactitud Geométrica Absoluta del Parcelario Rural Digital Vectorial del Departamento de Lavalleja", *Agrimensura*, vol. 44, pp. 2-7.

- Boey, S.S. (1999). "A model for establishing the Legal Traceability of GPS Measurements for Cadastral Surveying in Australia", Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia, UNISURV REPORT S-55, 205 pp.
- Chrisman, N.R. and Yandell, B.S. (1988). "Effects of Point Error on Area Calculations: A Statistical Model", *Surveying and Mapping*, vol. 48, pp. 241-249.
- Cvijetinovic, Z.; Avramovic, M. and Mihajlovic, D. (2015). "Digital cadastral map as foundation of coordinate based cadastre of Serbia", in *Survey Review*, vol. 47, no. 343, pp. 241-255.
- Decreto 318/995 (1995). "Registración de Firma y Título Profesional en la Dirección General del Catastro Nacional. Planos de Mensura", Uruguay, <<http://cort.as/-1694>>, consultado el 22 de enero de 2018.
- Decreto Provincial 1309/2017 (2017). "Normas para la confección y Registración de Planos de Mensura", Gobierno de la Provincia de Santa Fe, Argentina, <<http://cort.as/-1po5>>, consultado el 22 de enero de 2018.
- Faure Valbi, J.; Blanco, D.; Bermúdez, H.; Méndez-Baíllo, R.; Barreto, L. y Striwe, E. (2010). "Evaluación de la calidad de la exactitud geométrica absoluta del parcelario rural digital vectorial del Departamento de Lavalleja", Proyecto de Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (no publicado), 37 pp.
- FGDC (1998), "Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy", Federal Geographic Data Committee, FGDC-STD-007.3-1998, 28 pp.
- Hesse, W.J.; Benwell, G.L. and Williamson, I.P. (1990), "Optimising, maintaining and updating the spatial accuracy of digital cadastral data bases", *Australian Surveyor*, vol. 35, no. 2, pp. 109-119.
- INCRA (2013) "Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais", Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 4 pp.
- Jeffri, M., Hisham, O. and Joanes, J. (2017). "Effectiveness of Localised Adjustment in Strengthening National digital Cadastre Database", submitted to *Jurnal Teknologi*, <www.jurnalteknologi.utm.my>, 9 pp.
- Resolución 24/996 (1996). "Uniformización de normas de planos de mensura, copias, formatos, escalas.", Dirección Nacional de Catastro, Uruguay, <<http://cort.as/-1iPz>>, consultado el 22 de enero de 2018.
- Resolución 276-2013 (2013). "Verificación de subsistencia del Estado Parcelario", Administración General del Catastro, provincia de Catamarca, Argentina, <<http://cort.as/-1pn8>>, consultado el 22 de enero de 2018.
- Rousseeuw, P.J. and van Zomeren, B.C. (1990), "Unmasking Multivariate Outliers and Leverage Points", *Journal of the American Statistical Association*, vol. 85, pp. 633-639.

- Sandoval, V. (2004). “Cartografía elaborada con un método fotogramétrico simple versus un método digital (Softcopy-Fotogrametría)”, *BOSQUE*, vol. 25, no. 1, pp. 87-94.
- Siriba, D.N.; Dalyot, S. and Sester, M. (2012). “Geometric quality enhancement of legacy graphical cadastral datasets through thin plate splines transformation”, *Survey Review*, vol. 44, no. 325, no. 91-101.
- Sisman, Y. (2014). “Coordinate transformation of cadastral maps using different adjustment methods”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 37, no. 7, pp. 869-882.
- Tamim, N.J. (1992). “A methodology to create a digital cadastral overlay through upgrading digitised cadastral data”, PhD thesis, Ohio State University, 147 pp.
- Thapa, K. and Bossler, J. (1992). “Accuracy of spatial data used in geographical information systems”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 58, pp. 835-841.
- Tong, X.H., Shi, W.Z. and Liu, D.J. (2005). “A least squares-based method for adjusting the boundaries of area object”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 71, pp. 189-195.
- Tong, X.H., Shi, W.Z. and Liu, D.J., (2009), “Introducing scale parameters for adjusting area objects in GIS based on least squares and variance component estimation”, *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 23, no. 11, pp. 1413-1432.
- UNA-ONU (2009). “‘Unidos en la acción’ Proyecto conjunto C. Desarrollo de instrumentos para el monitoreo ambiental y territorial”, <<http://cort.as/-8Syf>>, consultado el 22 de enero de 2018.

Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba

Luciana Maria Da Silva*
Sílvio Rogério Correia de Freitas**

Recebido 9 de julho de 2018; aceito 17 de agosto de 2018

Abstract

Nowadays, the most central themes of Geodesy are linked to the provision of a unique Global Reference System, to which can be tied of unique form and with sufficient accuracy the geometrical and physical global changes. The Global Geodetic Reference Frame aims at better structuring Earth Observation Systems currently with prospects of the global changes determination at the level of one part per billion, considering several geometric and physical parameters. In this context, it is intended that the International Height Reference Frame, realization of the International Height Reference System, has an overall consistency of at least one centimeter in its realization and space/temporal control in the order of millimeter per year. Considering these aspects, it was analyzed the temporal evolution of the Imbituba Brazilian Vertical Datum utilizing tide gauge data from the sea level obtained from: Permanent Service for Mean Sea Level (1948 to 1968), University of Hawaii Sea Level Center (2001 to 2007) and Permanent Tide Gauge Network for Geodesy (2006 to 2016), and data from different altimetry missions from 1991 to 2015 obtained from the database of the Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. As like as, data obtained from GNSS continuous positioning of period from 2007 to 2016 from Brazilian GNSS Network for Continuous Monitoring, which were used to modeling the local movements of the crust. The results allowed discriminating the crust movements in relation to the sea

* Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Centro de Estudos de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, e-mail: lumasilva15@gmail.com

** Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas, Curitiba-PR, e-mail: sfreitas@ufpr.br
Os resultados apresentados neste trabalho foram advindos da Tese intitulada: “Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba”, defendida em 17 de fevereiro de 2017.

level. To achieve it, the trend of sea level variation evidenced by the tide gauge was used, as well as the variation of the vertical component obtained with the GNSS processing and the Sea Surface Height obtained from the satellite altimetry data.

Key words: *Brazilian vertical datum, tide gauge, satellite altimetry, GNSS continuous data, mean sea level.*

Resumo

Atualmente, os temas mais centrais da Geodésia vinculam-se ao provimento de um Sistema de Referência Global único, ao qual possam ser vinculadas de forma unívoca e com acurácia as mudanças globais de caráter geométrico e físico. O Global Geodetic Reference Frame visa a melhor estruturação dos Sistemas de Observação da Terra atualmente com perspectivas da determinação das mudanças globais ao nível de uma parte por bilhão, considerando vários parâmetros geométricos e físicos. Neste contexto pretende-se que o International Height Reference Frame, realização do International Height Reference System, possua consistência global de, pelo menos, um centímetro na sua realização e controle espaço/temporal na ordem do milímetro por ano. Considerando esses aspectos, analisou-se a evolução temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba utilizando dados maregráficos do nível do mar obtido de: Permanent Service for Mean Sea Level (1948 a 1968), University of Hawaii Sea Level Center (2001 a 2007) e Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (2006 a 2016), e dados de distintas missões altimétricas do período de 1991 a 2015 obtidos do Banco de Dados do Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Assim como, dados de posicionamento contínuo GNSS do período de 2007 a 2016, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, os quais foram utilizados para modelagem dos movimentos locais da crosta. Os resultados permitiram discriminar os movimentos da crosta em relação ao nível do mar. Para isto, utilizou-se a tendência de variação do nível do mar evidenciada pelo marégrafo, bem como a variação da componente vertical obtida com o processamento GNSS e da Sea Surface Height obtida dos dados dos satélites altímetros.

Palavras chave: *Datum vertical brasileiro, marégrafo, altimetria por satélite, dados contínuos GNSS, nível médio do mar.*

Resumen

Actualmente, los temas más centrales de Geodesia se vinculan a la provisión de un Sistema de Referencia Global único, al que puedan vincularse de forma unívoca y con exactitud los cambios globales de carácter geométrico y físico. El Global Geodetic Reference Frame tiene como objetivo la mejor estructuración de los Sistemas de Observación de la Tierra actualmente con perspectivas de la determinación de los cambios globales al nivel de una parte por mil millones, considerando varios parámetros geométricos y físicos. En este contexto, se pretende que el International

Height Reference Frame, realizado por International Height Reference System, posee consistencia global de, por lo menos, un centímetro en su realización y control espacio/temporal en el orden del milímetro por año. Considerando estos aspectos, análisis y evolución temporal del Datum Vertical Brasileño de Imbituba utilizando datos mareográficos del nivel del mar de: Permanent Service for Mean Sea Level (1948 a 1968), University of Hawaii Sea Level Center (2001 a 2007) y Red Mareográfica Permanente para Geodésia (2006 a 2016), y datos de distintas misiones altimétricas del período 1991 a 2015 obtenidos del Banco de Datos del Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Así como, datos de posicionamiento continuo GNSS del período de 2007 a 2016, de la Red Brasileña de Monitoreo Continuo, los cuales fueron utilizados para modelado de los movimientos locales de la corteza. Los resultados permitirán discriminar los movimientos de la corteza en relación al nivel del mar. Para esto, se utilizó la tendencia de variación del nivel del mar evidenciado por el mareógrafo, así como la variación del componente vertical obtenido con el procesamiento GNSS y de la Sea Surface Height obtenida de los datos de los satélites altimétricos.

Palabras clave: *Datum vertical brasileño, mareógrafo, altimetría por satélite, datos continuos GNSS, nivel medio del mar.*

Demandas Globais para Referencial Vertical

As mudanças no Sistema Terra têm como principais focos de análises, as redistribuições de massas observadas a partir da superfície ou do exterior da Terra, as quais se refletem principalmente nos aspectos geocinemáticos, nas variações do campo da gravidade e na rotação da Terra. Os quatro temas centrais do *Global Geodetic Observing System* (GGOS) relacionados com as mudanças globais são (GGOS, 2018): Theme 1 - *International Height Reference System* (IHRs); Theme 2 - *Geohazards Monitoring*; Theme 3 - *Sea Level Changes, Variability, and Forecasting*; Theme 4 - *Geodetic Space Weather Research*. O IHRs foi consolidado na Resolução nº 1 da IAG em julho de 2015 (IAG, 2015) e sua realização global está sendo discutida no âmbito do GGOS (IAG, 2018). Um dos aspectos mais presentes nas discussões das mudanças globais é o associado à evolução do Nível Médio do Mar (NMM), principalmente quando se observa a evolução em áreas costeiras, em vista dos impactos diretos sobre as áreas que usualmente apresentam a maior concentração de ocupação humana. Tal aspecto é enfatizado em Smith *et al.* (2010).

Do ponto de vista geodésico e considerando principalmente os temas 1 e 3 do GGOS, há que se discutir os aspectos geocinemáticos da interação oceano-conti-nente, fundamentais para a definição e realização de um Sistema Vertical de Referência (SVR) dentro de uma perspectiva de unicidade global (De Freitas, 2015; Da Silva *et al.*, 2018).

Em uma visão moderna, o Datum Vertical (DV) deve ser relacionado com uma referência global única, tal como previsto na Resolução nº 1 da *International Association Geodesy* (IAG) que estabeleceu, em julho de 2015, o IHRs (IAG, 2015) baseado em um valor unívoco de geopotencial e que as coordenadas verticais primárias nas Redes Verticais de Referência (RVRs) sejam os números geopotenciais. A questão do valor unívoco foi discutida em Sánchez *et al.* (2012). As exigências atuais relativamente aos SVRs e RVRs têm sua fundamentação expressa principalmente nos pressupostos do GGOS.

O maior problema implícito relativamente aos *Data* Verticais (DVs) na atualidade é o do entendimento dos movimentos efetivos da crosta e do NMM discriminando movimentos eustáticos e tectônicos. A forma efetiva de discriminar esses movimentos é o monitoramento da posição geocêntrica dos marégrafos costeiros (De Freitas *et al.*, 1998; Dalazoana *et al.*, 2005; Da Silva *et al.*; 2016; Da Silva, 2017, Da Silva *et al.*, 2018). Marégrafos instalados ao longo da linha de costa registram, portanto, os movimentos relativos do Nível do Mar (NM) e crosta, não discriminando os movimentos próprios de cada segmento. A integração dos dois segmentos pode ser melhor discriminada com a inserção de observações oriundas da altimetria por satélites (Bouman *et al.*, 2010; CSIRO Marine and Atmospheric Research, 2018).

O Datum Vertical Brasileiro de Imbituba (DVB-I) e o Datum Vertical Brasileiro de Santana (DVB-S) foram estabelecidos dentro de um conceito clássico, onde se utiliza o NMM observado durante um certo período, adotando-se como a altitude de referência zero para redes altimétricas nacionais (Luz, 2008). Muitos países, assim como o Brasil, possuem mais de um DV em vista de impossibilidades físicas de conexão de todos os segmentos de suas redes altimétricas. Mais de uma centena de DVs são assim definidos e realizados em todo o mundo (De Freitas *et al.*, 2002). O DVB-I é referência nacional predominante, onde mais de 90% da Rede Vertical Fundamental do Brasil (RVFB) está a ele referenciada. Assim, as análises neste trabalho são centradas sobre o DVB-I.

Neste trabalho utilizaram-se séries temporais de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System* - Sistemas Globais de Navegação por Satélites) junto ao DVB-I. Estas séries de coordenadas geocêntricas são associadas então, com séries temporais de observações maregráficas e de observações advindas dos satélites altímetros, buscando-se determinar a evolução temporal do DVB-I no IHRs.

Datum Vertical Brasileiro de Imbituba

Segundo Dalazoana (2006), Luz (2008) e Da Silva (2017), a implantação da Rede Vertical Brasileira iniciou-se em 1945, em Santa Catarina, por meio de nivelamento

geométrico. Sendo tomado como referência o Datum de Torres, com caráter provisório, pois o mesmo foi definido apenas com um ano de observações do nível do mar (1919-1920). Em 1949, o Inter-American Geodetic Survey (IAGS) iniciou a implantação da rede de estações maregráficas ao longo da costa brasileira.

Desde 1949 foram realizados diversos nivelamentos nas estações altimétricas que materializam o Datum de Imbituba. Em 1958, o Datum de Torres foi substituído pelo Datum de Imbituba, por possuir uma série temporal mais longa. Em 1959, foi então definido e adotado o Datum de Imbituba, através da promédia dos níveis médios do mar anuais, entre 1949 e 1957 (Alencar, 1990, p.70), no Porto de Imbituba, a partir do pressuposto que o NMM materializava o geoide.

A partir da década de 1980, com o advento das modernas técnicas espaciais, evidenciou-se que existem diferenças entre o NMM e o geoide, chamada de Topografia do NMM (TNMM). Diante dessa diferença, as altitudes passaram a apresentar inconsistências quando integradas às modernas técnicas baseadas em satélites artificiais. Em 1997, a Universidade Federal do Paraná (UFPR) em conjunto com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) iniciou as distintas campanhas multiparamétricas na área do Datum, que seriam realizadas ao longo dos anos. Dentre elas destacam-se: posicionamento GPS, monitoramento da pressão atmosférica, marés terrestres e oceânicas, bem como a recuperação das referências altimétricas históricas, reativação da estação maregráfica, gravimetria e densificação de observações geodésicas na região contígua envolvendo o Sistema Lagunar de Imarú e ainda a busca do vínculo da RVFB com o IHRS (Cordini, 1998; Dalazoana, 2006; Miranda, 2006; Luz, 2008; Ferreira, 2008; Luz *et al.*, 2009; Palmeiro, 2011, Da Silva *et al.*, 2016; Da Silva, 2017; Da Silva *et al.*, 2018).

Dalazoana (2006) realizou um extenso trabalho de recuperação de vínculos entre níveis de referência no DVB-I, possibilitando a integração de novas observações com sensores modernos aos níveis de referência históricos. Palmeiro *et al.* (2013) trataram de diversas facetas da solução do PVCG nas formas livres e fixadas junto ao DVB-I. Estas são consequências dos distintos Níveis de Referência (NRs) envolvidos além das resoluções das diversas bases de dados utilizadas, conforme pode ser visto na Figura 1.

Tendo como consequências os distintos NRs e resoluções de diversas bases de dados, Palmeiro (2011) aplicou distintas técnicas na obtenção de soluções para as altitudes geoidais da estação de Imbituba (IMBI). As soluções foram obtidas a partir de MGGs, utilizando Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ), e o Modelo de Ondulação Geoidal (MAPGEO 2010), atualmente já há uma atualização para 2015, o qual foi utilizado nesta pesquisa. Ressalta-se que a existência de distintas bases de dados, oriundas fontes, resoluções espaciais e referenciais distintos, é um problema na ideia de conexão da RVFB a um IHRS. Destaca-se que o estudo da compatibilidade de distintas fontes de dados, tais como observações maregráficas e altimetria

GPS, adicionalmente por métodos topográficos e de nivelamento de travessia. A partir destas estações e da conexão com o marégrafo podem-se discriminar movimentos verticais locais e do NMM em relação ao centro de massa da Terra. Para controle da posição geocêntrica e vínculo do marégrafo com a estação GPS são necessários seguir alguns procedimentos primordiais, como:

- Verificação dos marégrafos (analógico (boia) e digital);
- Rastreo GNSS contínuo na estação IMBT usada para materializar a posição geocêntrica do marégrafo;
- Nivelamento geométrico das Referências de Nível (RNs) (régua maregráfica e marégrafo) localizadas na área do porto.

Há ainda vários aspectos operacionais relacionados ao DVB-I que devem ser considerados. Dentre eles pode-se destacar a busca pela recuperação de séries temporais das observações do nível do mar assim como determinar a evolução temporal da sua posição geocêntrica e a busca de alternativas para obtenção da evolução do NMM desde a definição do Datum, discriminando inclusive possíveis mudanças de tendências (Dalazoana, 2006; Luz, 2008). Outros aspectos a serem considerados estão vinculados à instrumentação empregada, como a calibração do marégrafo, por exemplo. Esta pesquisa busca abordar os aspectos relacionados que não foram considerados anteriormente nas pesquisas, no DVB-I (Da Silva, 2017).

Dados disponíveis e utilizados para análise do nível do mar no DVB-I

Marégrafos

Até o final de 1968, a estação maregráfica de Imbituba era operada e mantida pela IAGS, os dados eram digitalizados e enviados ao *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL). No Banco de Dados (BD) do PSMSL é possível a obtenção de médias mensais e anuais para o período de 1948 a 1968. A partir de 1969, a operação da estação ficou sob responsabilidade das autoridades portuárias brasileiras. O BD do PSMSL disponibiliza médias mensais e anuais, referentes a algumas estações maregráficas brasileiras. Os dados trabalhados foram as médias mensais, do período de setembro de 1948 a dezembro de 1968.

No final da década de 1990, a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) foi proposta buscando a transição para o Datum Vertical SIRGAS e a correlação entre o DVB-I e outras referências altimétricas existentes ao longo da costa brasileira (Luz *et al.*, 2002). As primeiras estações da RMPG foram estabelecidas em 2001, mas a operação completa foi alcançada em 2008, quando todas as cinco estações que atualmente fazem parte da RMPG passaram a ter o conjunto dos sensores maregráficos (digitais e convencionais) e régua de marés especiais, projetadas para operação de longo prazo sem necessidade de substituição frequente (IBGE, 2013).

Os dados utilizados da RMPG foram diários com amostragem a cada 5 minutos. O período de dados utilizados é de novembro de 2006 a 11 de janeiro de 2016, totalizando 754022 observações a cada 5 minutos.

O Centro de estudos do Nível do Mar da Universidade do Hawaii (University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC) Research Quality), em seu BD há dados horários e médias diárias das estações maregráficas ao longo da costa brasileira e de outros países. O período de dados utilizados é de 22 de agosto de 2001 a 31 de dezembro de 2007, totalizando 48319 observações horárias. Este BD também disponibiliza médias mensais as quais já passaram por um controle de qualidade. Vale ressaltar que para se trabalhar com as três séries integradas é necessário identificar qual é a referência de leitura dos distintos sensores, marégrafo convencional, marégrafo digital e régua de maré, e assim pode-se estabelecer a diferença entre eles, possibilitando interligar as séries do nível do mar.

GNSS

Um dos papéis da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) é que desde 1997, vem contribuindo para a densificação regional da rede International Terrestrial Reference Frame (ITRF) e do International GNSS Service (IGS), garantindo uma melhor precisão dos produtos do IGS. O BD da RBMC disponibiliza os dados das estações, que em sua maioria fazem parte da Rede de Referência SIRGAS-CON, cujas coordenadas finais têm precisão da ordem de ± 5 mm, configurando-se como uma das redes mais precisas do mundo (IBGE, 2018). As estações da RBMC desempenham o papel de Rede Geodésica de Referência para o país, no referencial SIRGAS2000. Estas estações possuem receptores com desempenho acurado, proporcionando observações e resultados de qualidade e confiabilidade.

Para investigação acerca do movimento da crosta no DVB-I, nesta pesquisa trabalhou-se com os dados disponíveis no site do IBGE, a partir do Departamento de Geodésia, mais precisamente na página da RBMC. Os arquivos das estações que fazem parte do IGS05, IGS08 e IGB08 foram obtidos via *ftp - aiub/BSWUSER52*. Os dados disponibilizados das estações da RBMC são diários em formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), correspondentes às sessões iniciadas às 00h01min e encerradas às 24h00min, com intervalo de rastreamento de 15 segundos. Os receptores das estações possuem a capacidade de rastrear satélites GPS e GLONASS. Estes coletam e armazenam continuamente as observações de código e da fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites das constelações.

O período de dados utilizados é de 5 de setembro de 2007 a 2 de janeiro de 2016, tendo início na semana GPS 1443 e finalizando na semana GPS 1877, totalizando 435 semanas GPS e 3042 observações para cada estação. A escolha da data para início do processamento de dados coincide com a época de materialização da estação

IMBT. Para o processamento trabalhou-se com 35 estações distribuídas ao longo do território brasileiro.

Altimetria por Satélites

A necessidade do monitoramento do nível do mar, visando detectar sua variabilidade temporal e espacial, vem sendo estudada para análise dos efeitos climáticos e implicações em áreas costeiras. No âmbito da Geodésia, utilizam-se dados provenientes do monitoramento do nível do mar em um sentido muito mais amplo do que a realização da referência para as redes verticais clássicas. Tal é o caso do estudo dos efeitos de variação do NM na rotação da Terra realizado pelo *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)* (IERS, 2018).

A altimetria por satélites fornece uma série temporal de dados mais curta (cerca de 26 anos até o presente) quando comparada com a série temporal de dados provenientes de marégrafos (existem séries de mais de 150 anos de observações). Mesmo assim, a altimetria por satélite é uma técnica promissora para a detecção de variações no NMM porque o faz de forma independente de movimentos crustais e com grande cobertura espacial.

Foram utilizados os dados disponíveis no site do DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), mais precisamente do *Open Altimeter Database* (OpenADB). Destaca-se que os dados fornecidos para as diferentes missões já possuem certo grau de processamento, mas que dependendo do objetivo da pesquisa é necessário realizar alguns ajustes ou correções. Como se busca solucionar a questão de dados descontínuos do marégrafo trabalhou-se com distintas missões altimétricas.

Os dados das missões altimétricas disponibilizados no BD do DGFI estão em formato binário (NETCDF). Seguem uma estrutura sequencial, usualmente hierárquica, onde a missão corresponde n ciclos e m passes. Geralmente a partir dos ciclos se identificam o período de repetição, onde os passes das trilhas (em inglês *ground track*) significam a projeção da órbita do satélite na superfície da Terra, e o satélite realiza as observações. Estas em função de sua passagem em determinada região são ascendentes e descendentes. A intersecção entre um passe ascendente e descendente refere-se aos pontos de *crossover*.

Destaca-se que para se obter tanto a cobertura espacial quanto a resolução temporal é necessário realizar uma combinação de dados obtidos a partir de diferentes missões com diferentes padrões de recobrimento. Os dados de todas as missões altimétricas disponibilizados no BD do DGFI já foram anteriormente calibrados e corrigidos, assim como combinados. Sendo assim, foi possível a combinação dos produtos de todas as missões, nesta pesquisa. Vale ressaltar que a combinação de dados de diferentes missões espaciais requer a padronização dos dados bem como dos sistemas de referência. Salienta-se que os elipsoides utilizados pelas distintas missões da altimetria por satélite também são diferentes, como pode ser visto na Tabela 1. Neste

estudo foram utilizados dados derivados de oito missões altimétricas em sua configuração orbital original, os dados englobam um período de aproximadamente vinte e cinco anos (julho de 1991 a setembro de 2015), como apresentado na Figura 2.

Tabela 1
Parâmetros relevantes do elipsoide de referência
para transformação para um único SGR

<i>Parâmetros</i>	<i>T/P, JASON-1 e 2, e GFO</i>	<i>ERS-1 e 2, ENVISAT e SARAL</i>	<i>WGS-84</i>	<i>GRS-80</i>
Semieixo maior (a) - m	6378136,300000	6378137,000000	6378137,000000	6378137,000000
Semieixo menor (b) - m	6356751,600563	6356752,314245	6356752,314245	6356752,314140
Achatamento (1/f)	1:298,257	1:298,257223563	1:298,257223563	1:298,257222101
Excentricidade (e)	0,081819221456	0,081819190843	0,081819190843	0,0818191910435

Observa-se na Figura 2 que a missão T/P apresenta o maior período de dados, mas, como se tem a série temporal GNSS do período de 2007 a 2015, escolheu-se a missão JASON-2 para ser utilizada na comparação com a série maregráfica. Esta missão foi escolhida para validar a metodologia que foi então empregada em todas as outras missões apresentadas na Figura 2. Destaca-se que a missão JASON-2 teve duração do ano de 2008 a 2015 e a série da RMPG tem observações de 2006 a 2016, sendo assim foram utilizados aproximadamente sete anos para comparação.

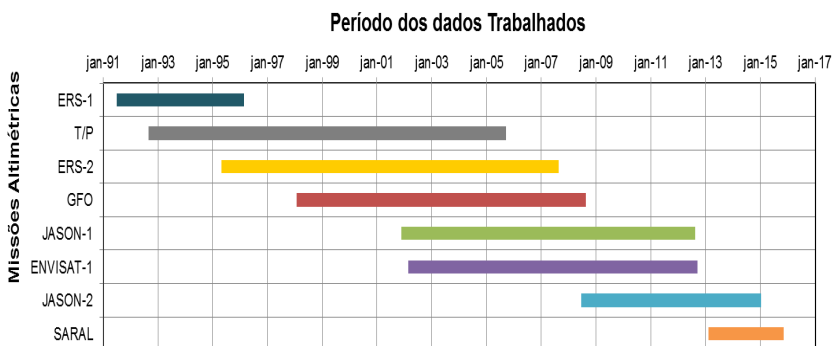


Figura 2. Período de disponibilidade de dados advindos da altimetria por satélite utilizados nesta pesquisa.

Aspectos metodológicos para análise da evolução temporal do DVB-I

A integração da técnica de altimetria por satélites e dados de marégrafos pode ser empregada no monitoramento das variações e da evolução do NMM desde que acompanhados do monitoramento de deslocamentos da crosta. Tal é a possibilidade advinda da utilização de séries temporais de dados de marégrafos associados com o GNSS. Assim, é possibilitada a detecção de movimentos da crosta necessários para obtenção de variações absolutas do NMM. Estes são certamente pressupostos para a modelagem do DVB-I de forma a evitar-se que movimentos verticais da crosta sejam interpretados como variações do NMM, como é representado na Figura 3. Outro ponto a destacar é que na falta de uma estação GNSS pode-se utilizar um gravímetro.

Destaca-se que a determinação das coordenadas geocêntricas a partir do processamento GNSS, o cálculo das velocidades de uma estação e as séries temporais provenientes de observações maregráficas, permitem definir o NMM em um SGR geocêntrico, obtendo valores do nível do mar em relação ao centro de massa da Terra e não relativos à estrutura na qual o marégrafo encontra-se fixo. Isto possibilita a comparação do NMM com os dados provenientes da altimetria por satélites. Possibilitando relacionar as séries temporais de nível do mar obtidas com o marégrafo com as séries de dados provenientes do emprego de modelos da altimetria por satélites.

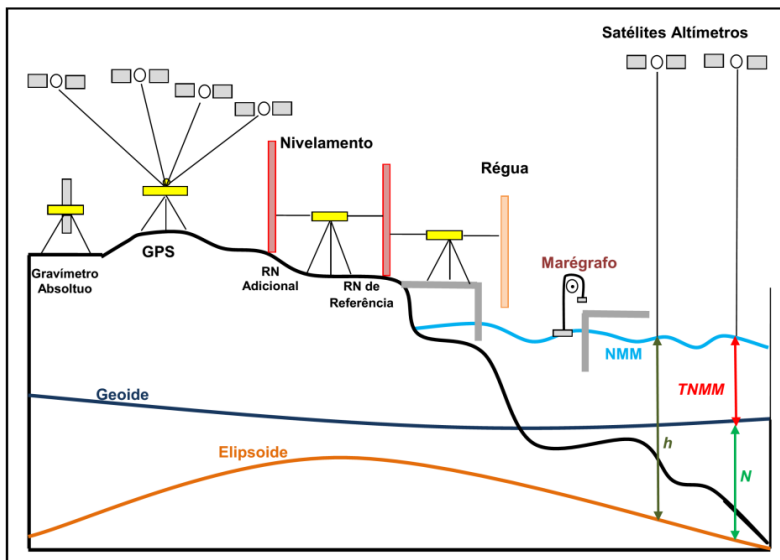


Figura 3. Apresenta um esquema importante para se vincular sensores distintos. Como por exemplo, as estações GNSS da RBMC têm instalações distintas dos sensores maregráficos. Então, para que se possa integrar os dados provenientes de distintos sensores é necessário vincular os sensores do marégrafo e da régua com o pilar GNSS via nivelamento geométrico.

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos utilizando os aspectos apresentados na Figura 4. Dalazoana e De Freitas (2006) mostraram os resultados baseados em dados maregráficos e de nivelamento, evidenciavam uma elevação no NMM no Porto de Imbituba em torno de 2 mm/ano. Estes resultados foram obtidos com integração, com base em altimetria por satélites, das séries temporais armazenadas no banco de dados do PSMSL e dados digitais de 2001 a 2004. Da Silva e De Freitas (2014), a partir de séries temporais de processamento GNSS, associadas com as séries maregráficas de 2007 a 2014, obtiveram uma elevação no NMM no Porto de Imbituba em torno de 2,4 mm/ano. Da Silva e De Freitas (2015), a partir da integração de dados de altimetria por satélites, das séries temporais armazenadas no banco de dados do PSMSL e dados maregráficos de 2006 a 2015, obtiveram uma elevação no NMM em torno de 2,05 mm/ano. Da Silva *et al.* (2016) obtiveram a mesma elevação que Da Silva e De Freitas (2014).

Análises metodológicas e dos resultados acerca da evolução temporal do DVB-I

Marégrafos

Em algumas situações observou-se que as séries temporais possuem leituras possivelmente anômalas ou com ausência de dados. Estes aspectos geralmente ocorrem por mudanças de equipamentos ou reposicionamento de sensores, anomalias reais no NM ou até mesmo devido o equipamento passar alguns dias até meses inativo. A Figura 4 mostra um exemplo de inatividade diária (dia 12), a série horária apresentada é do marégrafo digital de Imbituba para o mês de março de 2013.

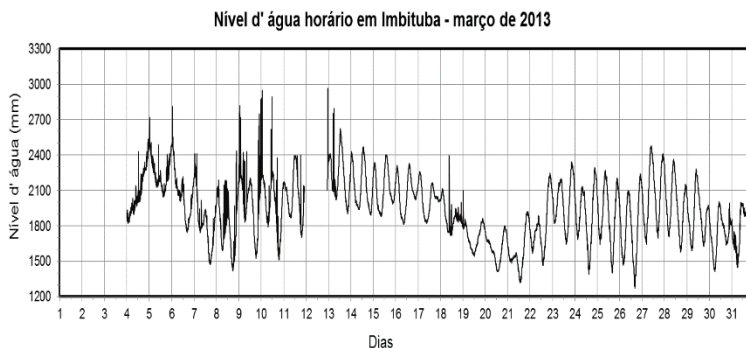


Figura 4. Série temporal de observações do nível d'água – Março de 2013, do marégrafo de Imbituba para análise de anomalias nas observações.

Como já mencionado, trabalhou-se com os dados disponíveis nos sites do IBGE, UHSLC e do PSMSL. Os dados disponibilizados pelo IBGE para Imbituba são diários com amostragem a cada 5 minutos. Então foi necessário desenvolver *scripts* para

leituras e concatenação dos dados. Primeiramente desenvolveu-se um *script* em *Python* para leitura dos dados. Após este processo é efetivada uma verificação de consistência e sua importação para o banco de dados desenvolvido no *MySQL*.

Os dados obtidos do marégrafo de Imbituba disponibilizados pelo IAGS no BD do PSMSL, no BD da UHSLC e no BD do IBGE - RMPG são séries de observações obtidas por distintos equipamentos. Isto implica que há diferenças nas referências das leituras. Para compatibilização das séries (IAGS e RMPG) estimou-se as diferenças ou o “zero” entre a referência das mesmas a qual cada série está vinculada. Para a integração dos dados da RMPG e da UHSLC com os do PSMSL foram utilizados os dados do Teste Van de Castele realizado em junho de 2003 e em maio de 2014. Adicionalmente utilizou-se o trabalho realizado por Dalazoana (2006). Estes foram utilizados para estimar as diferenças na referência zero do sensor digital, régua maregráfica e do sensor analógico existentes em Imbituba. Têm-se como referências geométricas primárias os sensores nas estações GNSS (IMBI SAT - 91854) e a atual estação SIRGAS-CON (IMBT SAT - 94024). Para estimar a diferença entre a referência do sensor digital e a referência dos dados do IAGS, utilizou-se o trabalho realizado por Dalazoana (2006) e as informações apresentadas na Figura 1. Ao analisar a série temporal obtida da RMPG e a série temporal obtida da UHSLC, evidenciou-se que as séries apresentam mesmo comportamento. Sendo assim, para integração considerou-se que o sensor digital referido aos dados da UHSLC refere-se ao sensor do IBGE de 2002 e 2003.

Foi realizada a análise estatística de regressão das observações mensais do nível do mar do marégrafo de Imbituba, evidenciando o coeficiente de correlação muito forte (0,99). Vale ressaltar que para a obtenção da estatística de regressão, considerou-se o nível de confiança de 95%. Em vista das correlações evidenciadas estima-se que se pode trabalhar com os dados mensais para se determinar as elevações do NM em mm/ano.

Após as análises, filtragem e compatibilização das séries, realizou-se a integração das séries UHSLC+RMPG (indicou uma elevação de cerca de 6,90 mm/ano, período de 2001 a 2016). Resultados do último relatório do IBGE (2016) apresentam resultados similares para este mesmo período analisado, uma variação do NMM relativo de 6,60 mm/ano. A integração das três séries (IAGS + UHSLC + RMPG) indicou uma elevação de cerca de 3,10 mm/ano, Figura 5, período de 1948 a 1968 e de 2001 a 2016.

Na Figura 5 percebe-se uma lacuna de dados do período de 1968 a julho de 2001. Isto se deve ao fato que o IAGS só obteve dados das autoridades brasileiras, até 1968. Assim como, a implantação do marégrafo de Imbituba ter sido realizada depois.

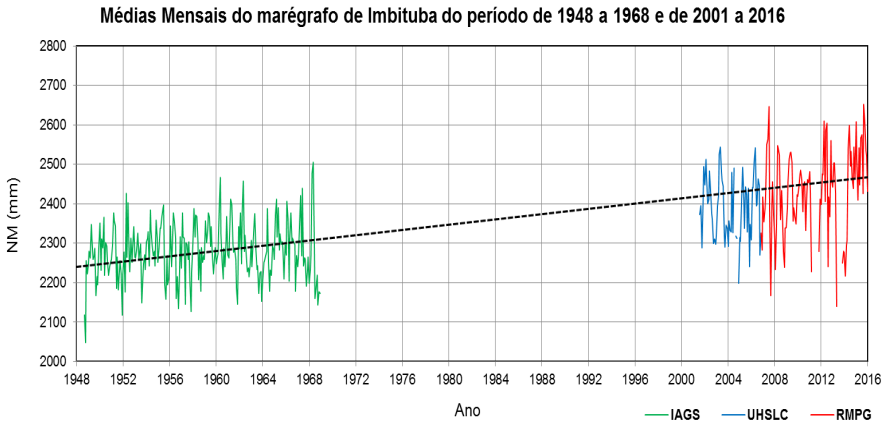


Figura 5. Integração das séries temporais (IAGS + UHSLC + RMPG) do nível do mar em Imituba.

GNSS

Para se trabalhar com o conjunto de dados GNSS, verificou-se a consistência dos dados. A média anual da disponibilidade dos dados é acima de 90%. Destaca-se que algumas estações apresentaram mais disponibilidade nos dados comparados a outras estações, por exemplo, a estação UFPR apresenta uma média de 99,78% na disponibilidade dos dados; em contrapartida a estação que apresenta menor disponibilidade é a de CRUZ com uma média de 62,39%, como se apresenta na Figura 6. Vale ressaltar que a estação IMBT é o objeto de estudo. Esta apresenta uma disponibilidade de dados de 84,77% ao longo do período analisado.

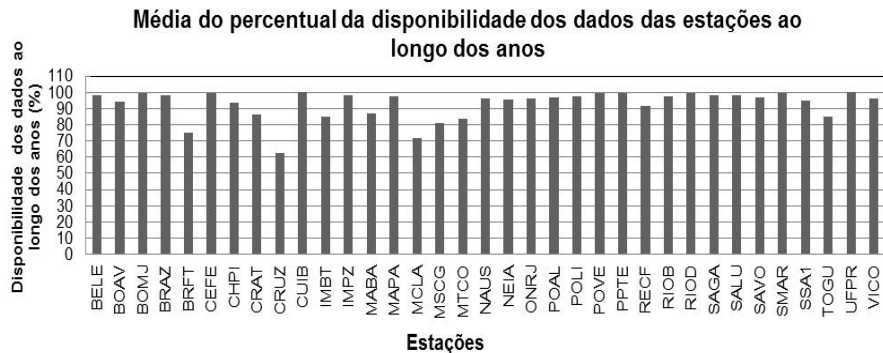


Figura 6. Média do percentual de disponibilidade dos dados das estações ao longo do período de setembro de 2007 a janeiro de 2016

Trabalhou-se com 98748 arquivos RINEX dos dados das estações GNSS obtidas da RBMC, correspondendo a um total de aproximadamente 420 *Gigabytes* de dados brutos. Após a seleção dos dados, foram definidas as principais informações e estratégias que seriam utilizadas no processamento dos dados GNSS no Bernese 5.2, como se apresenta na Tabela 2. Estas informações precisam estar bem definidas, pois o *software* Bernese é formado por um conjunto de programas que desempenham funções distintas dentro de um processamento de dados GNSS, para mais detalhes ver Da Silva (2017).

A partir do modo BPE (*Bernese Processing Engine*) realizou-se o processamento automatizado no *software* Bernese 5.2. Para o feito, desenvolveram-se dois *scripts* (extensão PCF) um diário baseado no RNX2SNX (RINEX para SINEX) do Bernese 5.2 (Dach, 2011) e um semanal baseado no SEMAN1584 do IBGE (IBGE, 2011), como pode ser visto em Da Silva (2017). O *script* semanal é utilizado ao finalizar o processamento diário, pois sua utilização é para avaliar as séries e realizar a combinação das soluções diárias em uma única solução.

Vale ressaltar que no processamento semanal a coordenada de cada estação é reduzida ao dia médio de cada semana GPS processada. Para geração das séries temporais é importante o conhecimento dos dados de entrada, as análises dos dados de saída e a validação dos resultados. No processamento diário são gerados dois arquivos importantes a serem utilizados no processamento semanal, um contém as coordenadas finais e outro contém as equações normais. A combinação das soluções diárias é realizada a partir de um ajustamento por mínimos quadrados das equações normais, onde se estima as coordenadas e velocidades *a priori* das estações. Na combinação de soluções GNSS podem-se realizar dois tipos de soluções: rede injuncionada (ponderação das coordenadas e velocidades *a priori* das estações de referência) e rede livre. Nesta pesquisa aplicaram-se as duas configurações.

Quando se trabalha com rede injuncionada podem-se aplicar três estratégias distintas: *minimum constraint*, coordenadas de referência injuncionadas e coordenadas fixadas. Sendo assim, utilizou-se a solução com a condição de *minimum constraint*, onde as coordenadas de referência foram injuncionadas fracamente para que as inconsistências apresentadas por Gregorius (1996) não ocorressem. Destaca-se que as vantagens de utilizar *minimum constraint* são as de: sua solução é obtida a partir de três translações, os erros nas coordenadas de referência são pequenos e não distorce a geometria da rede. Segundo Dach *et al.* (2015) essa condição é a mais recomendada para se obter as soluções finais.

Tabela 2
Principais Informações utilizadas no processamento dos dados
GNSS para detecção do movimento da crosta

Período	Semana GPS: 1443 a 1877 ^(*)
Observações	GNSS: Código e Fase (dupla diferença)
Software	Bernese 5.2 (modo BPE)
Número de Estações	35 estações (Extensão YYO ¹)
Taxa de Coleta	30 segundos
Ângulo de Elevação	3°
Estratégia de Linha de Base	OBS-MAX
Órbita	Produtos do centro de análise CODE contendo as análises das órbitas GNSS (GPS e GLONASS) – Final IGS05, IGS08 e IGb08 ^(*)
Modelo de Nutação	IAU2000R06
Modelo de Polo	IERS2010XY
Efemérides Planetárias	DE405.PH
Modelo Global de Gravidade	EGM2008
Marés Oceânicas	OT_FES2004.TID
Maré da Terra Sólida	TIDE2000
Redução da carga dos efeitos troposféricos <i>a priori</i>	Dry_GMF ² (Na etapa de detecção dos resíduos – GPSEST)
Estimativa dos parâmetros do atraso troposféricos: Zênite e Gradiente	Wet_GMF ² (Etapa de detecção dos resíduos: Zênite – 2 horas; Sigma a priori relativo – 5 m Gradiente – 24 horas; Sigma a priori relativo – 5 m)
Estimativa da Troposfera	Modelo Troposférico VMF ³ (Solução Final)
Ambiguidades	Estratégia baseada em observações, distância e tempo. QIF ⁴ – linhas de base maiores que 2000 km
Unificação da referência das diferentes técnicas do rastreamento dos receptores	Correções DCB ⁵
Modelo de Ionosfera	<i>Global Ionosphere Maps</i> (diário, com extensão ION) obtido do CODE
Modelo de Carga Oceânica	FES2004 (extensão BLQ)
Redução de Carga Atmosférica	Carga atmosférica (extensão ATL)
Definição da Placa Oceânica	<i>South American</i> - SOAM (extensão PLD)
Dados Meteorológicos	Imbituba e Florianópolis (extensão MET)
Variação de Centro de Fase	Absoluto (IGS05, IGS08 e IGb08)
Coordenadas e Velocidades	(IGS05, IGS08 e IGb08)
Soluções Diárias	Soluções Semilivres – Todas as estações injuncionadas em $\sigma = \pm 1$ m. Arquivos de saída: SINEX ⁶
Tempo de Processamento	Cerca de 9 horas
Soluções Semanais	Soluções Semilivres - Injuncionadas em $\sigma = \pm 1$ m. Arquivos de saída: SINEX ⁶
Tempo de Processamento	Cerca de 30 minutos

(*) Semanas GPS: 1443 a 1631 – IGS05; 1632 a 1708 – IGS08; 1709 a 1877 – IGb08

¹ Indica os dois últimos dígitos do ano da observação / ²*Global Mapping Function* / ³*Vienna Mapping Function* / ⁴*Quasi-Ionosphere Free* / ⁵*Differential (P1-C1) Code Biases* / ⁶*Software Independent Exchange*

Vale ressaltar que diante dos subitens apresentados, as informações foram organizadas de forma que se consiga identificar os aspectos referentes ao movimento da crosta. Como a estação IMBT é o objeto de estudo desta pesquisa, então a velocidade da componente *up*, obtida a partir do processamento GNSS foi comparada com os

resultados das velocidades a partir do Modelo VEMOS2015 sugerido pelo SIRGAS. Como resultado do processamento das semanas GPS 1443 a 1877, software Bernese 5.2, observa-se que há uma subsidência na estação IMBT (componente *UP*), uma taxa de -3,02 mm/ano, Figura 7. Em contrapartida com a utilização do modelo de velocidade VEMOS2015, obteve-se -3,40 mm/ano. Destaca-se que o valor obtido no processamento, representa de forma mais realística o movimento da estação IMBT.

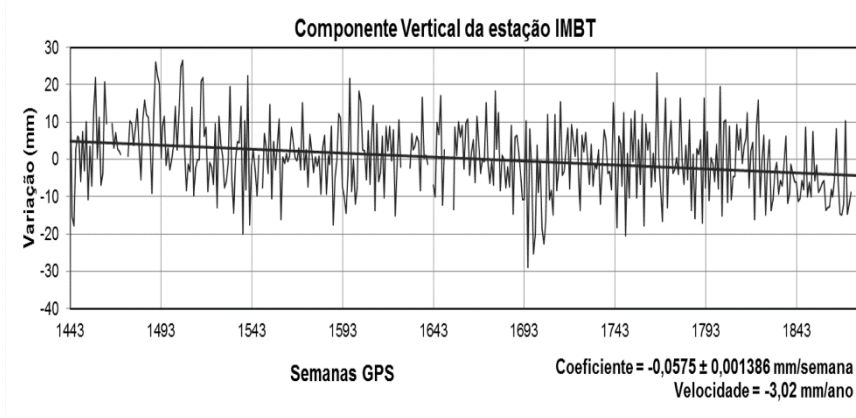


Figura 7. Variação Temporal, coeficiente de variação e velocidade da componente vertical da estação IMBT.

A estimativa da tendência determinada para a estação IMBT pode ser utilizada para determinação da posição geocêntrica do marégrafo do DVB-I, pois apresenta uma série temporal com mais de 5 anos de processamento de dados e a série temporal gerada está em consonância com a elaborada pelo IBGE e SIRGAS.

Integração das séries temporais: dados maregráficos, observações GNSS e dados provenientes da Altimetria por Satélites

Os dados no BD do DGFI encontram-se armazenados em formato binário. Para se realizar a leitura destes arquivos e para análise das informações específicas foram desenvolvidas nesta pesquisa rotinas em linguagem *Python*. Também foi necessário desenvolver rotinas para análise das informações maregráficas, devido à necessidade de se ter as informações no mesmo instante de tempo dos dados provenientes da altimetria por satélites.

Os dados da *SSH* utilizados para análise foram considerados dentro do intervalo de $SSH_M \pm 3\sigma$. Destaca-se que SSH_M é o valor médio da *SSH* para o período analisado e σ o desvio padrão da média. Evidencia-se que a série temporal das observações maregráficas é horária e o efeito do barômetro inverso não foi corrigido. Como é

necessário que as séries temporais sejam compatíveis, foi preciso eliminar as correções das marés oceânicas e barômetro inverso que estavam aplicadas aos valores de *SSH*. Isto foi realizado para que se possa assumir que tanto os marégrafos como os satélites altímetros estão observando o mesmo sinal oceanográfico.

Para reamostragem da série maregráfica do NM em Imbituba obtida da RMPG (horária) no mesmo instante de tempo das séries de *SSH* da altimetria por satélites, realizou-se interpolação cúbica. Os detalhes do desenvolvimento da interpolação cúbica podem ser vistos em Alves *et al.* (2005). Destaca-se que esse processo também foi realizado para as séries temporais maregráficas horárias do NM obtidas da UHSLC. Os valores de *SSH* vêm com dia Juliano, então as séries maregráficas foram colocadas na mesma referência temporal. Neste trabalho o dia Juliano 0 foi estabelecido como às 12:00 horas TU de 1/1/2000.

Na comparação entre observações maregráficas e dados provenientes de missões altimétricas, duas situações são consideradas possíveis e importantes a serem levadas em conta: as observações maregráficas precisam ter a mesma amostragem dos dados dos satélites altímetros; e é preciso trabalhar com uma série temporal de observações maregráficas com no mínimo 5 anos.

Nesta pesquisa para comparação das séries de observações maregráficas com as séries de *SSH* foi preciso considerar a trilha do satélite mais próxima do marégrafo. A comparação foi feita considerando as 71 células mais próximas do marégrafo. Destaca-se que o conjunto de células compreende dados localizados até aproximadamente a 500 km da costa. Sendo assim o mais importante é considerar a célula mais próxima da costa onde o desvio padrão das observações ainda se situa dentro de valores aceitáveis por não terem sido afetados por efeitos costeiros. O comprimento da célula está relacionado com a amostragem dos dados que é fornecida para os usuários, a taxa de amostragem fornecida é de 1 Hz (1 observação por segundo), considerando a velocidade do satélite isso resulta em 1 observação a cada ± 7 km de comprimento contadas a partir da linha do equador.

Para todas as missões altimétricas foram feitas comparações utilizando como base o coeficiente de correlação e o desvio padrão entre as séries temporais do marégrafo e na célula. Observou-se nas análises, da missão JASON-2 utilizada para validação da metodologia, que a célula mais próxima da costa (cerca de 56 km) era a de número 475, com coeficiente de correlação de 0,78 e desvio padrão de 76 mm. Porém, os melhores resultados foram obtidos para a célula 478 (cerca de 77 km), com coeficiente de correlação de 0,93 e desvio padrão de 69 mm. Após as análises das células das missões, realizou-se a comparação relativa entre a série temporal maregráfica e a série temporal da missão altimétrica JASON-2, uma vez que as duas séries não possuem zeros de referências iguais. Para melhorar a comparação das séries no intuito de integrar, aplicou-se uma correção diferencial de maré baseada nas componentes harmônicas, mais detalhes em Da Silva (2017). Após a correção de maré foi realizada

a análise do coeficiente de correlação e do desvio padrão, obtendo os seguintes valores para a célula 478: 0,96 e 50mm, respectivamente. Estas análises foram realizadas para todas as missões, mais detalhes em Da Silva (2017).

Como as células estão distantes da costa, foi necessário realizar a extrapolação dos dados. Sendo assim, foi considerado o estudo realizado por Dalazoana (2006) para os marégrafos de Ilha Fiscal e Cananeia. A partir de um polinômio de segundo grau, estimou-se o valor de *SSH* na célula que correspondia à posição do marégrafo de Imbituba (*SSH_{CELMi}*) e em cada ciclo era considerado o perfil da *SSH* nas 71 células mais próximas do marégrafo. O polinômio pode ser escrito, segundo Dalazoana (2006), como a equação (1):

$$SSH_{CELMi} = \alpha + b(CELMi) + c(CELMi)^2 \quad (1)$$

Na equação (1) os coeficientes (a, b e c) são calculados em função dos valores da *SSH* nas 71 células evidenciadas mais próximas do marégrafo; *CELMi* é a célula que indicaria a posição do marégrafo, sendo estimada a partir da distância entre o marégrafo e a célula dos dados de *SSH* mais próxima, assim como se leva em consideração o comprimento de 7 km da célula.

Para gerar a série temporal dos valores de *SSH* extrapolados a partir das missões altimétricas, calculou-se para cada ciclo das missões um valor de *SSH*. Para realizar a comparação da série temporal das observações maregráficas com a série gerada para os valores de *SSH_{CELMi}*, aplicou-se interpolação cúbica, nas observações derivadas do marégrafo para o mesmo instante da série temporal do *SSH_{CELMi}*.

Como após a correção diferencial de maré, os dados são mais compatíveis, sendo assim, a extrapolação foi realizada para os dados dos altímetros com correção. Vale destacar que se realizou a compatibilização do referencial das missões altimétricas, onde se aplicou a metodologia desenvolvida por Keyers *et al.* (2013, p.110). Geralmente o NMM tem um comportamento local distinto quando comparado aos resultados globais, isto decorre do fato de existirem regiões nas quais a tendência é de elevação do NMM e há regiões com tendência de descensão do NMM. Pode-se supor que a taxa de variação temporal do NMM observada pelo satélite altímetro é a mesma que a variação temporal observada pelo marégrafo com a consideração dos possíveis movimentos da crosta determinada pelo processamento GNSS. Onde se pode escrever na forma da equação (2):

$$Tendência_{Marégrafo} + Tendência_{GNSS} - Tendência_{Altimetria} = 0 \quad (2)$$

Vale destacar que o posicionamento GNSS é muito importante na discriminação dos possíveis movimentos da crosta. Trabalhou-se com um período de aproximadamente 25 anos de dados altimétricos. Deste período, 9 anos de dados altimétricos

foram utilizados para preencher a inexistência de dados na série temporal das observações maregráficas. E 8 anos foram utilizados para substituir as médias das observações maregráficas consideradas como *outliers*. Destaca-se que foram utilizados 17 anos de missões altimétricas para preencher as lacunas existentes entre os dados maregráficos e as observações maregráficas detectadas como *outliers*, disponibilizados pela UHSLC e pela RMPG, devido às intempéries existentes ao longo do tempo.

As estimativas de tendência dependem da amostragem e do período trabalhado. Adicionalmente devem-se levar em conta as correções aplicadas aos dados, assim como se discriminar possíveis movimentos da crosta e realizar a correção desses efeitos nas observações maregráficas. Com a utilização de observações maregráficas obtidas dos BD do PSMSL, UHSLC e RMPG dos períodos de setembro de 1948 a dezembro de 1968, agosto de 2001 a setembro de 2007, novembro de 2006 a janeiro de 2016, respectivamente, destaca-se que os dados maregráficos apresentam descon continuidades, as quais foram preenchidas com os dados de altimetria por satélite do período de setembro de 1992 a setembro de 2015. O processamento dos dados GNSS para obtenção da componente altimétrica, do período de setembro de 2007 a janeiro de 2016, auxiliou na determinação da tendência da variação temporal do NMM em Imbituba. A Figura 8 apresenta a integração das séries das observações maregráficas com os dados das missões altimétricas. Para isto, foi desenvolvido um script em Python para que se pudesse concatenar as médias que estavam em dias julianos para médias mensais.

Destaca-se que a tendência do marégrafo de Imbituba foi considerada do período de 2007 a 2016, obtida com os dados da RMPG, onde apresentou uma tendência de $5,26 \text{ mm/ano} \pm 0,11 \text{ mm/ano}$. A tendência da coordenada altimétrica foi obtida a partir do processamento dos dados no software Bernese 5.2, onde apresentou uma tendência de $-3,02 \text{ mm/ano} \pm 0,39 \text{ mm/ano}$. E a tendência do altímetro foi obtida a partir das missões altimétricas com a correção oceânica, sendo uma tendência de $2,23 \text{ mm/ano} \pm 0,42 \text{ mm/ano}$. Vale destacar que se considerou este período, devido coincidir com a materialização da estação GNSS IMBT.

Aplicando estas tendências na equação (2) evidenciou-se que existe uma evolução do NMM na região do DVB-I pela determinação da variação temporal resultante de aproximadamente $+ 2,24 \text{ mm/ano}$. Esta variação está em concordância com as medições realizadas pelo NOAA (2016), onde se destaca uma variação de aproximadamente $2,9 \text{ mm/ano} \pm 0,4 \text{ mm/ano}$, no período de 09/1992 a 03/2016 e o AVISO (2016) que obteve uma variação global de aproximadamente $3,36 \text{ mm/ano} \pm 0,1 \text{ mm/ano}$, no período de 1993,01 a 2015,97.

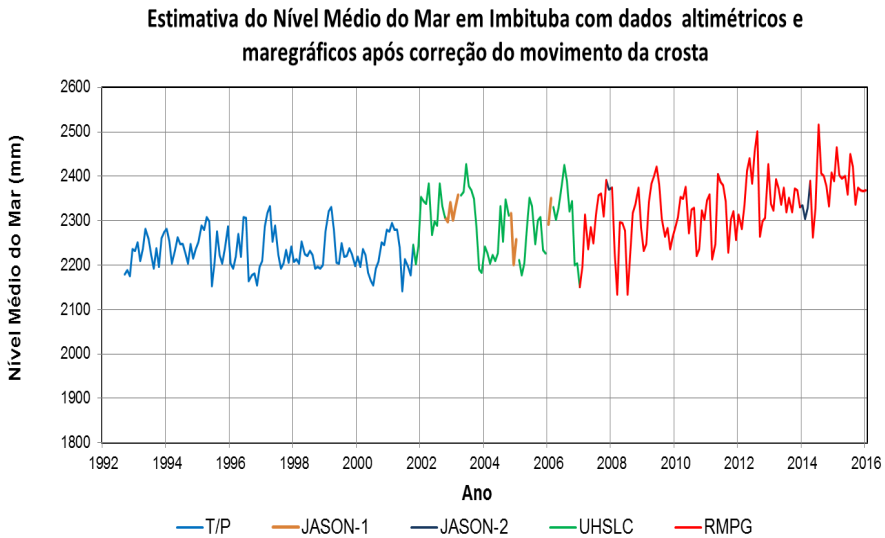


Figura 8. Estimativa do nível médio do mar em Imbituba do período de 1992 a 2016, com os dados das missões altimétricas e observações maregráficas após a correção do movimento da crosta.

Conclusão

Os estudos da análise da evolução temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba se deram com a utilização de dados provenientes de séries temporais do posicionamento GNSS, de observações maregráficas e de dados provenientes da altimetria por satélites, tendo como objetivo proposto analisar a evolução temporal do DVB-I, para detectar possíveis movimentos da crosta e a evolução do nível médio do mar local.

As observações GNSS também foram utilizadas para o controle da posição geocêntrica do marégrafo. Os dados foram processados com o software Bernese 5.2. Junto à estação IMBT foram processadas mais 34 estações, todas de monitoramento contínuo, com o objetivo de aumentar a estabilidade da solução semanal. A componente altimétrica foi estimada diariamente, mas realizou-se o processamento semanal onde se considera o dia médio da semana. Cada semana apresentou um valor diferente, no final do processamento estimou-se o coeficiente semanal que foi de -0,0633 mm/semana. E a taxa de subsidência de -3,02 mm/ano, período de setembro de 2007 a janeiro de 2016, destaca-se que este valor é próximo ao de -3,4 mm/ano calculado utilizando o modelo VEMOS2015.

As observações provenientes do marégrafo de Imbituba (RMPG) foram filtradas visando sua integração com os dados armazenados no banco de dados do PSMSL e do UHSLC. A integração destas séries indicou uma tendência de elevação do nível do mar em uma taxa de 3,10 mm/ano, sem considerar possíveis movimentos da

crosta, período de setembro de 1948 a dezembro de 1968 e de agosto de 2001 a janeiro de 2016. O resgate das informações do nível do mar provenientes dos dados registrados no marégrafo no DVB-I possibilitou uma melhor análise por estar se trabalhando com uma série temporal longa. Analisando as observações maregráficas da RMPG, mesmo período da análise das observações da RBMC, obteve-se uma variação temporal de 5,26 mm/ano. Sendo assim, a partir das análises da tendência temporal do NMM no DVB-I discriminando movimentos do NMM e da crosta por intermédio dos dados maregráficos integrados com séries temporais do posicionamento GNSS, obteve-se uma elevação de 2,24 mm/ano, para o período de 2007 a 2016.

Para melhor análise do nível médio do mar, analisaram-se dados oriundos de distintas missões de altimetria por satélite. Assim como, com a utilização de distintas missões altimétricas confirmou-se os problemas referentes à perda de resolução dos altímetros nas proximidades da costa. Para todas as missões analisadas evidenciou-se que as células que estavam mais próximas da costa possuíam coeficientes de correlação mais baixos e desvios padrão maiores do que algumas células mais distantes da costa. Com a análise da tendência da série dos altímetros obteve-se uma elevação de 2,23 mm/ano para o período de 2007 a 2016.

A evolução temporal do DVB-I pode ser modelada a partir de longas séries temporais (mais de 5 anos) de dados da altimetria por satélite, observações GNSS e observações maregráficas. Estas informações estão em consonância com a visão para integração com o IHRs. Sendo assim, os resultados baseados na análise da posição geocêntrica do DVB-I com base em séries temporais GNSS, maregráficas e altimétricas da região do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba evidenciaram uma taxa de elevação de + 2,24 mm/ano na região do *Datum*. Este valor está em concordância com informações globais de elevação do nível médio do mar. Ficou evidenciada a evolução do NMM na região do DVB-I pela determinação da variação temporal da posição geocêntrica do marégrafo associada com a análise dos dados maregráficos e altimétricos.

Bibliografia

- Alencar, J.C.M. (1990). “Datum Altimétrico Brasileiro”, *Caderno de Geociências*, no. 5, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 69-73.
- Alves, D.B.M.; Meneguette Jr, M.; Monico, J.F.G. (2005). “Utilizando spline cúbicas naturais para atenuação de erros no posicionamento GPS”, *Tend. Matemática Aplicada e Computacional*, vol. 6, no. 2, pp. 197-205.
- AVISO (2016). “Data: Mean Sea Level”. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/oceanindicators-products/mean-sea-level.html>>, acessado em 10/03/2018.

- Bouman, J.; Bosch, W. Goebel, G.; Müller, H.; Sánchez, L., Schmidt, M.; Sebera, J. (2010). “Das Schwerefeld der Erde-Messen, Darstellen und Auswerten”, *Fachbeitrag. Zeitschrift für Vermessungswesen*, vol. 135, pp. 87-92.
- Cordini, J. (1998). “Aspectos Geodinâmicos no Datum da Rede Altimétrica do SGB”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 183 pp.
- CSIRO Marine and Atmospheric Research (2018). “Sea Level Rise”. Disponível em: <<http://www.cmar.csiro.au/sealevel/>>, acessado em 02/05/2018.
- Dach, R. (2011). “Script RNX2SNX: RINEX TO SINEX”, Bernese 5.2.
- Dach, R.; Lutz, S.; Walser, P.; Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software version 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern.
- Dalazoana, R.; Luz, R.T.; Lima, S.R.S.; Miranda, Fr. A.; Palmeiro, A.S.; Miranda, Fa. A.; Freitas, S.R.C. (2005). “Controle Vertical das RRNN e da Posição Geocêntrica do Marégrafo no Porto de Imbituba”, IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil Anais 18 a 20 de maio de 2005.
- Dalazoana, R. (2006). “Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 188 pp.
- Dalazoana, R.; De Freitas, S.R.C. (2006). “Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro”, *Boletim de Ciências Geodésicas: Resumos*, vol. 12, no. 1, pp. 173-174.
- Da Silva L.M. (2017). “Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 270 pp.
- Da Silva, L.M.; De Freitas, S.R.C. (2014). “Análise da Variação Temporal do Nível Médio do Mar nas Estações da RMPG”, Simpósio Sirgas, La Paz, Bolívia, Novembro 24-26.
- (2015). “Estimativa da posição atual do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de dados maregráficos, observações GNSS e Altimetria por Satélites”, Simpósio Sirgas, Santo Domingo, República Dominicana, Novembro 16-20.
- Da Silva, L.M.; De Freitas, S.R.C.; Dalazoana, R. (2016). “Análise de Séries Temporais Maregráficas correlacionadas com observações GNSS do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC”, *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 68, pp. 73-90.
- (2018). “Analysis of Dynamic Effects on the Brazilian Vertical Datum”, IntechOpen Science: Sea Level Rise and Coastal Infrastructure: Yuanzhi Zhang, Yijun Hou and Xiaomei Yang, pp. 21-38, DOI: 10.5772/intechopen.71546. Available from: <<https://www.intechopen.com/books/sea-level-rise-and-coastal-infrastructure/analysis-of-dynamic-effects-on-the-brazilian-vertical-datum>>.

- De Freitas, S.R.C.; Cordini, J.; Krueger, C.P.; Santos, M.C. (1998). "The Geocentric position of the Brazilian Vertical Datum", International Symposium on Marine Positioning: "United Nations Year of the Oceans", Florida Institute of Technology Melbourne, FL, USA, Proceedings of INSMAP98, pp. 230-240.
- De Freitas, S.R.C.; Medina, A.S.; Lima, S.R.S. (2002). "Associated Problems to link South American Vertical Networks and possible approaches to face them", IAG Symposia, vol. 124: Vertical Reference Systems; in: Drewes, H.; Dodson, A.H.; Fortes, L.P.S.; Sánchez, L.; Sandoval, P. (ed.), Springer, Berlin, pp. 318-323.
- De Freitas, S.R.C. (2015). "SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America", *Revista Cartográfica*, núm. 91, pp. 75-91.
- Ferreira, V.G. (2008). "Análise da Componente Anômala do Geopotencial no Datum Vertical Brasileiro com base no sistema lagunar de Imauri, SC", Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 116 pp.
- GGOS (2018). "The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS - Additional Information: GGOS Components". Disponível em: <<http://www.ggos.org/>>, acessado em 12/05/2018.
- Gregorius, T. (1996). *Gipsy-Oasis II - How it works*, Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne.
- IAG (International Association of Geodesy) (2015). "IAG and IUGG Resolutions - IAG Resolutions: Prague, Czech Republic 2015. Resolution nº 1 for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRs)". Disponível em: <http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf>, acessado em 02/05/2018.
- IAG (2018). "IAG Office - IAG GGGOS". Disponível em: <<http://iag.dgfi.tum.de/index.php?id=253>>, acessado em 05/03/2018.
- IBGE (2011). *Manual de Atividades*, Centro de Processamento SIRGAS-IBGE.
- (2013). "Relatório de Monitoramento da variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia –2011-2012", Rio de Janeiro, 46 pp.
- (2016). "Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015", Rio de Janeiro, 65 pp.
- (2018). "RMPG: Introdução". Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/rmpg.shtm?c=7>>, acessado em 12/03/2018.
- IERS (2018). "International VLBI Service for Geodesy and Astrometry". Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/TechniqueCentres/IVS/ivs.html>>, acessado em 21/05/2018.

- Keyzers, J.H.; Quadros, N.D.; Collier, P.A. (2013). *Vertical Datum Transformations across the Littoral Zone. Report prepared for the Commonwealth Government of Australia*, Department of Climate Change and Energy Efficiency, 110 pp.
- Luz, R.T.; De Freitas, S.R.C.; Dalazoana, R. (2002). “Acompanhamento do Datum Altimétrico Imbituba através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro”, IAG Symposium, 2002, VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra, Santiago-Chile.
- Luz, R.T. (2008). “Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 228 pp.
- Luz, R.T.; Bosch, W.; De Freitas, S.R.C.; Heck, B.; Dalazona, R. (2009). “Evaluating the Brazilian Vertical Datum Through Improved Coastal Satellite Altimetry Data”. Michael Sideris (org.), *IAG Series: Observing our Changing Earth*. 1 ed., Berlin, Springer-Verlag, vol. 133, pp. 735-741.
- Miranda, F.A. (2006). “Contribuição para a Análise do Campo da Gravidade na Região do Datum Vertical Brasileiro”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 89 pp.
- NOAA (2016). “Laboratory for Satellite Altimetry/Sea Level Rise: Global sea level times series”. Disponível em:
<http://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php>, acessado em 11/05/2018.
- Palmeiro, A.S. (2011). “Análise do Vínculo do Datum Vertical Brasileiro a um Sistema Global de Altitudes com Base em Soluções Fixadas e Livres do PVCG”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 159 pp.
- Palmeiro, A.S.; De Freitas, S.R.C.; Dalazona, R. (2013). “Análise do vínculo do Datum Vertical Brasileiro a um Sistema Global de Altitudes”, *Revista Brasileira de Cartografia*, nos. 65-66, p. 1097-1111.
- Sánchez, L.; Dayoub, N.; Čunderlík, R.; Minarechová, Z.; Mikula, K.; Vatrt, V.; Vojtíšková, M.; Šíma, Z. (2012). “W0 Estimates in the Frame of the GGOS Working Group on Vertical Datum Standardisation”, *Series International Association of Geodesy Symposia*: Springer. Chapter: Gravity, Geoid and Height Systems, vol. 141, pp. 203-210.
- Smith, J.; Wigginton, N.; Ash, C.; Fahrenkamp-Uppenbrink, J.; Pennisi, E. (2010). “Changing Oceans: Introduction to Special ISSUE”, *Science*, vol. 328, pp. 1497. DOI: 10.1126/science.328.5985.1497.

Automatic evaluation of geospatial data quality using web services

Emerson M. A. Xavier*
Francisco J. Ariza-López**
Manuel A. Ureña-Cámara**

Received June 28, 2018; accepted August 19, 2018

Abstract

The geomatics sector is going through a data overload scenario which new geospatial datasets are generated almost daily. However there are few or nothing information about the quality of these datasets, and they should be evaluated aiming to provide users some information about their quality. In this context we propose a solution for the automatic quality evaluation of geospatial datasets using the web services platform. This approach is compound by automatic evaluation procedures for quality control of topological consistency, completeness, and positional accuracy described in the Brazilian quality standard. Some procedures require an external dataset for comparison purposes. Hence we provide a set of synthetic datasets and apply over them an experimental design aiming to select suitable methods to find the correspondences between datasets. The solution has an interoperability tier that links users and automatic procedures using the standardized interface of Web Processing Service (WPS). Our results showed that the automatic procedure works very similar to the manual one.

Key words: *Spatial data quality, Geographic web services, Quality control assessment.*

Resumen

El sector geomático vive un escenario de sobrecarga de datos donde casi todos los días se generan nuevas bases de datos geoespaciales (BDG). Sin embargo, hay poca

* Brazilian Army Geographic Service, QGEx, bloco F, 1 piso, 70630-901 Brasilia, Brazil
e-mail: emerson.xavier@eb.mil.br

** Universidad de Jaén, Paraje de las Lagunillas s/n, E-23071, Jaén, España,
e-mail: fjariza@ujaen.es; e-mail: maurena@ujaen.es

o ninguna información sobre la calidad de estas BDG. En este contexto proponemos una solución para la evaluación automática de la calidad de los datos geoespaciales utilizando servicios web. Este enfoque está compuesto por procedimientos de evaluación automática para el control de calidad de la consistencia topológica, completión y exactitud posicional según se especifican en el estándar brasileño. Algunos procedimientos de control requieren datos externos para fines de comparación. Por ello, en este trabajo, proporcionamos un conjunto de datos sintéticos generados según un diseño de experimentos con el objetivo de seleccionar los métodos más adecuados para encontrar correspondencias entre las BDG. La solución desarrollada tiene un capa de interoperabilidad que vincula usuarios y procedimientos automáticos utilizando la interfaz del Web Processing Service (WPS). Nuestros resultados mostraron que el procedimiento automático funcionó muy similar al manual.

Palabras clave: *calidad de información geográfica, servicios web geográficos, control de calidad.*

Resumo

O setor geomático vive um cenário de sobrecarga de dados onde quase todos os dias são geradas novas bases de dados geoespaciais (BDG). Entretanto, existe pouca ou nenhuma informação sobre a qualidade destas BDG. Neste contexto propomos uma solução para a avaliação automática da qualidade dos dados geoespaciais utilizando serviços web. Este enfoque está composto por procedimentos de avaliação automática para o controle de qualidade da consistência topológica, completude e exatidade posicional segundo se especificam no padrão brasileiro. Alguns procedimentos de controle requerem dados externos para fins de comparação. Por isso, neste trabalho, proporcionamos um conjunto de dados sintéticos gerados segundo um desenho de experimentos com o objetivo de selecionar os métodos mais adequados para encontrar correspondências entre as BDG. A solução desenvolvida tem uma camada de interoperabilidade que vincula usuários e procedimentos automáticos utilizando a interface do Web Processing Service (WPS). Nossos resultados mostraram que o procedimento automático funcionou muito similar ao manual.

Palavras chave: *qualidade de informação geográfica, serviços web geográficos, controle de qualidade.*

Introduction

To date there are lots of geospatial data sources available to generate data almost instantaneously. Imagery from aerial or satellite platforms, and the popularization

of Unmanned Aerial Vehicle (UAV), or ‘drones’, has allowed to generate geospatial datasets in an unmanageable way, what some authors named ‘big data’ trend (Crampton *et al.*, 2013). ‘Terabytes are quite typical today’ said Traxler and Hesina (2017). Other important data source is the crowdsourced data, generated by volunteers almost daily (Neis and Zielstra, 2014). This overload data scenario brings new challenges for the official spatial data suppliers, or National Mapping and Cadastral Agencies (NMCA). Traditionally, these institutions create and manage authoritative datasets in a standardized way. However, today many data ‘producers’ represent the same phenomena, geospatial features, following their own rules. This new scenario may lead users questioning the quality of available datasets.

In these cases, few or nothing information about the quality of a spatial dataset is available, so we believe that would be interesting a web service with the capability of assess the quality of a test dataset against a reference dataset. A data quality validation service is an appealing topic in the geospatial research agenda which has been developed in current projects (Kruse, 2014).

A recent trend in the geomatics industry is to automatise the most of the productive chain, as we can see in recent projects, e.g. the ‘mapping as a service’ in Ordnance Survey Ireland (Coumans, 2016) and the use of UAV in cadastral mapping (Ramadhani *et al.*, 2016). It is fair to assume that data quality evaluation also experiences this trend.

The state-of-the-art for the automation of quality control for spatial data has shown recent advances. The study of Donaubauer *et al.* (2008) proposed a web service with the ability to generate quality information of assessed data via web services. The work used well-defined standards when was executed, with the Web Processing Service (WPS) (Schut, 2007) interface to process the quality control, and ISO 19115 (ISO, 2003) for the quality report by means of metadata elements. WPS is an open specification from the Open Geospatial Consortium (OGC). Despite the simplicity of the quality procedure, just an overlay of previously tagged data with some quality elements, this study seemed to be the first attempt of an automatic evaluation service in the literature. Other study also indicated that the quality evaluation can be executed through a WPS (Mobasheri, 2013). More recently, Meek *et al.* (2016) presented a solution for quality evaluation of crowdsourced data using service chaining and WPS.

In the Universidad de Jaén emerged a successful research focused on the automation of the positional accuracy evaluation, due to Ruiz-Lendínez (2012). The author proposed a solution for automatic positional accuracy assessment of polygonal features using a matching approach. His thesis presented encouraging results and this is our starting point for the current research.

The free availability of some geospatial information for final users has raised questions about the cost of maintenance for NMCAs (Carpenter and Snell, 2013).

However, as more data is available for users, more becomes necessary evaluate their quality in order to identify if these data fits the users' requirements. This may be the opportunity for an authoritative data supplier plays the role of data 'validator', providing standardized and useful quality reports about the data users want. Other possibility is the raising of quality certification for geospatial data, as pointed by Ariza-López (2013).

Research question, hypothesis, and goals

Our main research question arises from the need of an on-line evaluation service: how far can we automate the evaluation of geospatial data quality over a web environment?

The current state-of-the-art of the automation of quality control for spatial data shows some recent research:

- It is possible to generate quality information about a spatial dataset using the WPS interface (Donaubauer *et al.*, 2008), also confirmed by a later work (Mobasheri, 2013);
- Studies inside the ESDIN project described semi-automatic data quality evaluation services (Beare *et al.*, 2010);
- Ruiz-Lendínez (2012) proposed and demonstrated a feasible solution for automation of the positional accuracy evaluation using a matching approach;
- Ariza-López (2013) argued quality of spatial data has received recent and continuous development of international standards, notably the ISO 19157: 2013 (ISO, 2013);
- Fan *et al.* (2014) demonstrated that is possible evaluating various quality elements - completeness, positional accuracy, thematic accuracy, and shape accuracy - for building footprints using a test dataset against a reference one, where the first step was the matching between datasets; and
- Brovelli *et al.* (2017) presented a new procedure to perform comparisons between crowdsourced and authoritative road datasets with a significant degree of automation.

Taking these facts as working assumptions we can formulate our working hypothesis H1: A fully automatic evaluation procedure is possible, without any human intervention, that assesses a test dataset against a reference dataset along the time. We believe a data quality validation service will bring gains for data producers and data consumers. Data producers may benefit themselves by a standardized dataset to evaluate their own contracted products. Data consumers may obtain a quality report for the spatial data using a standard protocol (WPS).

Considering this hypothesis, our main goal is to develop a web service able to evaluate the quality of geospatial datasets using the standardized interface of WPS in a fully automatic way.

Institutional relevance and publications

This study was developed in the research group GIIC (Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica) at the Universidad de Jaén, Spain. This research group (TEP-164) has produced relevant studies in the geospatial data quality area, among them we can cite: Ariza López and Atkinson Gordo (2008), Ariza-López *et al.* (2011), Ariza-López and Mozas-Calvache (2012), Ariza-López and Rodríguez-Avi (2014), Ruiz-Lendínez *et al.* (2016) and Gil de la Vega *et al.* (2016).

The research project was supported by the Brazilian Army's Department of Science and Technology (DCT), which sponsored this project on behalf of the Geographic Service (DSG). DSG leads the geospatial information in the Brazilian Army. According to Brazilian law (Brasil, 1967) DSG is responsible to generate and maintain the technical standards for the national land mapping.

This research project generated the following publications at the present date: Xavier *et al.* (2014), Ariza-López *et al.* (2015), Xavier *et al.* (2015a, 2015b, 2015c), Xavier *et al.* (2016a, 2016b), Ariza-López *et al.* (2017) and Xavier *et al.* (2017).

This paper summarizes the whole study that can be found in Xavier (2017). The remainder of this document is structured as follows. The next section presents our proposal and the material used to test the approach. The following section briefly describes the experiments executed to validate our proposal, and discusses the obtained results. The last section brings some conclusions.

Method and material

In order to reach our main goal we propose a framework for automatic geospatial data quality evaluation. This framework is composed by the architecture of a solution towards quality assessment through web services. This solution is presented in the following section. Then, the next section presents the material used in the experiments to validate this approach.

Quality control service

We propose a three-tier architecture for a web services platform focused on quality control of geospatial data (see Figure 1), which we are calling the quality control service. From a bottom-up point of view, the first tier, Data Access, is used by external evaluation methods to manage reference data: retrieve and matching. The second tier, named Evaluation, implements the different quality evaluation procedures available at the service. The last tier, named WPS, handle client requests using the standardized interface of OGC WPS. This architecture was first discussed at Ariza *et al.* (2015).

Data Access tier manages the relation between test and reference data. Since direct external evaluation procedures depend on reference data for comparison, this

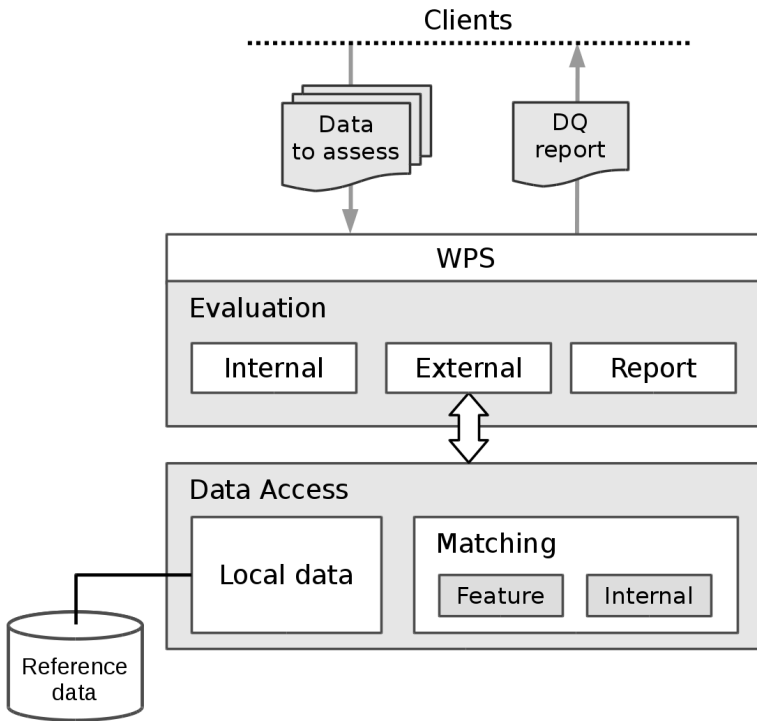


Figure 1. Proposed architecture for a quality control service. Source: Xavier (2017).

tier provides the correspondences between datasets in order to permit compare them. There are two ways to facilitate reference data: (1) remote: who calls the service provides the reference data; or (2) local: the service itself has its own reference dataset. The Data Access tier manages the access to local reference data, and also provides a Matching module that provides data matching between assessed and reference data (local or remote). According to what is been requested by the external method, this matching can be in the feature level, or in the internal level, i.e., by considering vertices of a geometry.

Feature matching is a requirement of direct external evaluation methods in geospatial data quality assessment. In the proposed architecture the Matching module plays the role of finding the correspondences between these two datasets (reference and test). These correspondences can be at the feature level (among objects), or the internal level (among parts of objects, e.g. vertices). There are a plethora of approaches facing matching at feature level, as discussed in Xavier *et al.* (2016a). So we decided to investigate which ones would be adequate to our service. In order to achieve this goal we opened three working fronts: (1) development of similarity

measures; (2) preparing a matching testbed; and (3) over this testbed we applied some matching methods under the control of design of experiments. Regarding internal matching, there are few matching methods focused in this actuation level, as we can see in Xavier *et al.* (2016a). In this study, we are proposing a new method for matching geospatial data at internal level based on the shape context descriptor from Belongie *et al.* (2002).

Evaluation tier contains the implementations of evaluation methods, notably direct internal and direct external. Direct external methods require an external reference that is managed in the Data Access tier. Evaluation tier also contains the Report module that is responsible for generate the quality report in different ways: a human-readable report, or an XML report in ISO format, current (ISO, 2016) or legacy (ISO, 2007). This tier represents the kernel of this architecture towards the quality assessment of geospatial data using web services. In this study we adopt the Brazilian standard for geospatial data quality, named CQDG (DCT, 2016). Taking into account that this standard provides quality evaluation procedures for all geospatial data products in Brazil, this standard plays the role of quality model in this research project. In this part of architecture we develop internal and external quality evaluation procedures described in the CQDG standard for products of type vector geospatial datasets.

In the proposed architecture, the WPS tier is the point of contact with the clients. This tier handles requests and responses using the WPS interface. Quality evaluation procedures often involve complex tasks and people from different organizations or departments. Facing this situation we have two design principles: interoperability and simplicity. The interoperability principle indicates that the WPS tier should follow the WPS specification and schemas in order to permit a standardised way of communication. The simplicity principle leads us to avoid unnecessary issues in the processing itself, so the processing ‘part’ should be as straight as possible. The WPS tier should manage all communication issues, validation procedures, and client-server tasks.

The proposed architecture is intended to be general for automatic quality assessment, and should be applied independently of datasets or software platform.

Material

In this research project we use *R* as the statistical computing tool. *R* is a language and also an environment focused on statistic tools and graphics (R Core Team, 2014). Other relevant materials are the geospatial data used to test the quality control service, and the developed software that effectively implements the concepts proposed in this study.

We adopted geospatial datasets built up from mapping data produced by official Spanish mapping agencies for Andalucía, southern Spain. This area was chosen

because the Universidade de Jaén is located there, and because there are freely available data covering this area. We used 1:25,000 data from the Base Topográfica Nacional 1:25,000 (BTN25) of national mapping provided by the Instituto Geográfico Nacional of Spain (IGN, 2015). We used 1:10,000 data from the Base Cartográfica de Andalucía 1:10,000 (BCA10) of regional mapping provided by the Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (ICEA, 2015). We selected different landscapes: coast and mountain, rural and urban. The following mapping sheets 1:25,000 were used to define the study: 0896-3, 0896-4, 1003-4, 0999-1, 0999-2, 0999-3, and 0999-4.

All software developed in this research project is based on the TerraLib library. TerraLib is an open-source GIS library developed by the Brazilian National Institute for Space Research (INPE) (Câmara *et al.*, 2008), available at the TerraLib repository (DPI, 2013). Inside TerraLib there is a subprojects named TerraOGC – a framework for Web-GIS development that contains modules for many OGC specifications, like WMS, WFS, WCS, and GML. For this research project the existing WPS module was improved in order to accommodate the design principles described of the WPS tier. As a part of WPS process was created a data quality processing module (DQEval) which contains most of the code related to this project. It can be found on-line at its repository (DPI, 2017).

Results and discussion

This section presents the experiments executed in order to validate the proposed framework for geospatial data quality evaluation through web services. The essays are designed to assess the proposed framework using both real and synthetic data.

The first experiment deals with the creation of the feature matching testbed. This testbed is composed by four groups of datasets: (1) initial datasets: original mapping data; (2) morphology modified: synthetic datasets created with emphasis in some specific morphology class for lines or areas; (3) systematic disturbance: synthetic datasets created from affine transformations; and (4) random disturbance: synthetic datasets created over the influence of randomly generate displacement vector fields. We believe that this testbed is a valuable tool to be shared with other researches in the GIScience area, so we have submitted it to a public repository of scientific data (Xavier *et al.*, 2017). The dataset generated in this experiment were used in the following experiments.

The second experiment used the concepts of design of experiments (DOE) (Montgomery and Runger, 2003) to compare a set of feature matching methods over the matching testbed developed in the previous experiment. This experiment is divided according to the geometric primitive: point, line, and area, in this order. Each type of geometry has its own essays, or configurations. The designed experiment for feature matching is composed by 20 essays: points (P1-P5), lines (L1-L6),

and areas (A1-A9). Based on the results of these many essays, it was possible to select some matching methods with the more suitable results to our quality control service. Figure 2 shows an overview of this DOE with the factors considered for each geometry, and the respective number of treatments.


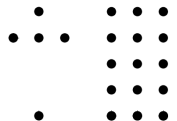
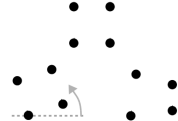
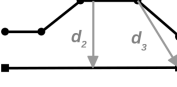
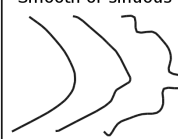
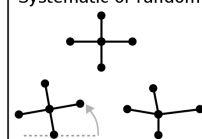
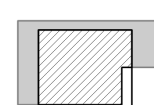
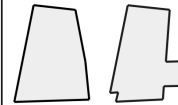
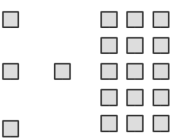
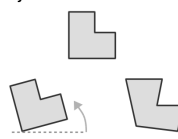
	Method	Morphology	Context	Disturbance
Point	Distances + thresholds + criteria  treatments=20	None	Distinct or uncertain  treatments=9	Systematic or random  treatments=22287
Line	Distances + thresholds + criteria  treatments=90	Smooth or sinuous  treatments=25	None	Systematic or random  treatments=37145
Area	Distances + thresholds + criteria  treatments=48	Simple or complex  treatments=20	Distinct or uncertain  treatments=15	Systematic or random  treatments=37145

Figure 2. Overview of DOE for feature matching. It is possible to identify the factors applied to each geometry type.
Source: Xavier (2017).

After test the influence of factors over the matching procedures we were able to draw some recommendations from the results of the DOE for feature matching. Taking into account data in scales closer to 1:25,000 and 1:10,000, where it is fair to suppose that there is no significant positional difference between these datasets, we can recommend the following geometric matching methods:

- Point matching: Euclidean distance, closer criterion, 10 m threshold;
- Line matching: SMHD measure (Tong *et al.*, 2014), closer criterion, 10 m threshold, combined with partial orientation 0.4 rad; and
- Area matching: overlap area measure, closer criterion, and 10 m² threshold.

The third experiment were focused on test the new internal matching method developed in this research project. In this study we are adopting a quality model of the Brazilian standard (DCT, 2016), whose describes a positional quality procedure based in points. Therefore, we developed this internal matching method in order to

increase the quantity of points for the positional quality assessment, since it allows to use area and line features at the quality process. The results indicated that the current implementation of the new internal matching method has two highlighted gains when compared with other equivalent methods (Fan *et al.*, 2014, Ruiz-Lendínez *et al.*, 2016): (1) this method is able to deal with many-to-many area pairs and find their corresponding parts; and (2) this method can work with polygon holes, what can increasing the quantity of corresponding parts. Also, the results regarding line parts did not reach a performance acceptable for quality assessment.

In the fourth experiment we tested the validity of the quality evaluation procedures developed in the Evaluation tier of the quality control service using the datasets generated in the first experiment. The experiments were divided according to the quality element in consideration: topological consistency, completeness, and positional quality. The results revealed that the topological consistency procedures worked as provided in the standard, in a fully automatic way. Regarding the completeness element, we verified the performance of automatic completeness in all geometric primitives (point, line, area). The results revealed that the automatic implementation worked satisfactorily. However, we identified that the performance of the selected matching method influences the performance of the automatic quality evaluation. In the positional accuracy essay we verified the performance of the automatic implementation of the planimetry procedure in 11 regions: nine point regions and two area regions. The results revealed that the automatic positional accuracy procedure performed similar to the manual procedure, with the quality category preserved in all considered regions.

Finally, in the last experiment we checked whether the WPS tier is capable to play the role of interoperability layer between clients and automatic quality evaluation procedures. In this phase we also checked the possible quality reports generated. The results aroused some aspects of the applicability of WPS while a service interface facing quality evaluation. We can point out: (1) WPS permits multiple inputs and outputs; (2) WPS is ready for service chaining; and (3) process extension is relatively easy. So we can conclude that the WPS interface is platform feasible to implement the quality control service.

Conclusions

The geomatics industry is living a data overload scenario which are raising new challenges to the authoritative data producers, or NMCAs. Today it is possible to find diverse datasets representing the same geographic extent from many producers: volunteers (e.g. OpenStreetMap), commercial mapping companies, and official mapping agencies (at distinct levels). Each one creates its datasets following its own acquisition rules (and sources), which leads us to the question: ‘which one does fit my purposes?’, a fitness for use issue (Servigne *et al.*, 2006).

In this context, this study seeks to provide a solution able to answer the key-question: ‘what is the quality of this dataset?’ Where the geospatial data is created almost automatically (e.g. Coumans, 2016), we also need a quality evaluation tool capable to respond in the speed that the data are created. Therefore the main goal of this study is to develop a standardized web service with the capability to assess the quality of geospatial datasets in fully automatic way. In order to reach this goal we developed a framework for automatic evaluation of geospatial data quality. Then we tested each part of our solution for the quality control service in the experimental phase.

The obtained results confirmed that the main goal was reached: we have a quality control service that automatically assess the quality of geospatial datasets with results comparable to the manual procedure. These results corroborated our main hypothesis: a fully automatic procedure, running over a web environment, is able to assess the quality of geospatial datasets without any human intervention.

The contributions of this study are manifold. We presented full automatic procedures to evaluate topological consistency, commission, omission, and positional accuracy. To the best of authors’ knowledge, this is the first implementation for the last three quality elements over a WPS. Regarding geospatial data matching, in this study we presented a design of experiment to test matching methods at feature level, as embracing as possible; and we developed a new method at internal level for areal features. The matching testbed was released to the research community as an effort to provide a homogeneous framework to test new methods.

The proposed solution has its limitations: the capacity of automatic quality assessment for external methods (those that require an external dataset) is directly related to the performance of the matching methods (at all levels). Then, the performance of the automatic quality control service depends on the performance of used matching methods.

In a classical book of cartography, Robinson *et al.* (1995) argued that ‘one of the most difficult tasks for cartographers is to indicate to map readers the quality of data used’. In the web era, we hope that the cartographers might delegate this ‘painful’ task to the machines.

References

- Ariza-López, F.J. (2013). “Calidad de la información geográfica: perspectivas de futuro”, *Conferencia Internacional de Geografía y Medio Ambiente*, Ciudad de México.
- Ariza López, F.J. and Atkinson Gordo, A.D. (2008). “Variability of NSSDA estimations”, *Journal of Surveying Engineering*, 134(2), pp. 39-44. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2008)134:2(39).

- Ariza-López, F.J. and Mozas-Calvache, A.T. (2012). "Comparison of four line-based positional assessment methods by means of synthetic data", *GeoInformatica*, 16(2), pp. 221-243. DOI: 10.1007/s10707-011-0130-y.
- Ariza-López, F.J. and Rodríguez-Avi, J. (2014). "A statistical model inspired by the National Map Accuracy Standard", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(3), pp. 271-281. DOI: 10.14358/PERS.80.3.000.
- Ariza-López, F.J.; Mozas-Calvache, A.T.; Ureña-Cámara, M.A.; Alba-Fernández, V.; García-Balboa, J.L.; Rodríguez-Avi, J. and Ruiz-Lendínez, J.J. (2011). "Influence of sample size on line-based positional assessment methods for road data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(5), pp. 708-719. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.06.003.
- Ariza-López, F.J.; Xavier, E.M.A. and Ureña-Cámara, M.A. (2015). "Proposal of a web service for positional quality control of spatial data sets", *International Workshop on Spatial Data and Map Quality*, Valletta, Malta.
- Ariza-López, F.J.; Xavier, E.; Chicaiza, E. and Buenaño, X. (2017) "Métodos de evaluación de la calidad posicional en Hispanoamérica: análisis de la situación", *Revista Cartográfica*, 94, Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), pp. 65-88.
- Beare, M.; Onstein, E.; Mäkelä, J.; Marttinen, J.; Henriksson, R.; Jakobsson, A.; Tsoulos, L.; Williams, F.; Meulenaer, L.; De Persson, I. and Kavadas, I. (2010). *ESDIN Quality Final Report - Part A*. Available at: <http://www.esdin.eu/sites/esdin.eu/files/D8-4_ESDIN_Quality_Final_Report.pdf>.
- Belongie, S.; Malik, J. and Puzicha, J. (2002). "Shape matching and object recognition using shape contexts", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(4), pp. 509-522. DOI: 10.1109/34.993558.
- Brasil (1967) "Decreto-Lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967", *Brasília: Diário Oficial da União*. Available at: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Decreto-Lei/1965-1988/Del0243.htm>.
- Brovelli, M.A.; Minghini, M.; Molinari, M. and Mooney, P. (2017). "Towards an automated comparison of OpenStreetMap with authoritative road datasets", *Transactions in GIS*, 21(2), pp. 191-206. DOI: 10.1111/tgis.12182.
- Cámara, G.; Vinhas, L.; Ferreira, K.R.; Queiroz, G.R.; Souza, R.C.M.; Monteiro, A.M.V.; Carvalho, M.T.; Casanova, M.A. and Freitas, U.M. (2008). "TerraLib: an open source GIS library for large-scale environmental and socio-economic applications", in Hall, G.B. and Leahy, M.G. (eds.) *Open Source Approaches in Spatial Data Handling*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 247-270. DOI: 10.1007/978-3-540-74831-1_12.
- Carpenter, J. and Snell, J. (2013). *Future trends in geospatial information management: the five to ten year vision*. Available at: <<http://ggim.un.org/docs/meetings/3rd UNCE/UN-GGIM-Future-trends.pdf>>

- Coumans, F. (2016). "Ordnance Survey Ireland shows new perspectives", *GIM International*, 30(12), pp. 27-29.
- Crampton, J.W., Graham, M., Poorthuis, A., Shelton, T., Stephens, M., Wilson, M.W. and Zook, M. (2013) "Beyond the geotag: situating 'big data' and leveraging the potential of the geoweb", *Cartography and Geographic Information Science*, 40(2), pp. 130-139. DOI: 10.1080/15230406.2013.777137.
- DCT (2016). *Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG)*. Brasília. Available at: <http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf>.
- Donaubauer, A.; Kutzner, T. and Straub, F. (2008). "Towards a quality aware web processing service", in *Proceedings of the 6th Geographic Information Days*, Münster, Germany, pp. 16-18. Available at: <<http://www.gi-days.de/archive/2008/downloads/acceptedPapers/Papers/Donaubauer,Kutzner,Straub.pdf>>.
- DPI (2013). *TerraLib repository tag 4.2.2*. Available at: <<https://svn.dpi.inpe.br/terralib/tags/v-4-2-2/>>.
- (2017). *TerraOGC repository tag 1.2.6*. Available at: <https://svn.dpi.inpe.br/terraogc/tags/v_1-2-6/>.
- Fan, H.; Zipf, A.; Fu, Q. and Neis, P. (2014) "Quality assessment for building footprints data on OpenStreetMap", *International Journal of Geographical Information Science*, 28(4), pp. 700-719. DOI: 10.1080/13658816.2013.867495.
- Gil de la Vega, P., Ariza-López, F.J. and Mozas-Calvache, A.T. (2016). "Models for positional accuracy assessment of linear features: 2D and 3D cases", *Survey Review*, Taylor & Francis, 48(350), pp. 347-360. DOI: 10.1080/00396265.2015.1113027.
- ICEA (2015). *Base Cartográfica de Andalucía 1:10.000-BCA10*. Available at: <<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/bca/index.htm/>>.
- IGN (2015). *Base Topográfica Nacional 1:25.000 (BTN25)*. Available at: <<http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesBDGbtn25.do>>.
- ISO (2003). *ISO 19115:2003. Geographic information - Metadata*.
- (2007). *ISO 19139:2007. Geographic information - Metadata - XML schema implementation*.
- (2013). *ISO 19157:2013. Geographic information - Data quality*.
- (2016). *ISO/TS 19157-2:2016. Geographic information - Data quality - Part 2: XML schema implementation*.
- Kruse, D. (2014). "Tools needed for implementing interoperability ELF Geo Tools for schema transformation, data quality validation, generalisation, edge-matching, visualization, change detection, table joining and geo product", Aalborg, Denmark.

- Meek, S., Jackson, M. and Leibovici, D.G. (2016). "A BPMN solution for chaining OGC services to quality assure location-based crowdsourced data", *Computers and Geosciences*, 87, pp. 76-83. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.12.003.
- Mobasheri, A. (2013). "Exploring the possibility of semi-automated quality evaluation of spatial datasets in Spatial Data Infrastructure", *Journal of ICT Research and Applications*, 7(1), pp. 1-14. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2013.7.1.1.
- Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2003). *Applied statistics and probability for engineers*, 3rd ed. New York, John Wiley & Sons.
- Neis, P. and Zielstra, D. (2014). "Recent developments and future trends in volunteered geographic information research: the case of OpenStreetMap", *Future Internet*, 6(1), pp. 76-106. DOI: 10.3390/fi6010076.
- R Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria. Available at: <<http://www.r-project.org/>>.
- Ramadhani, S., Bennett, R. and Nex, F. (2016). "UASs for cadastral applications", *GIM International*, 30(12), pp. 30-31.
- Robinson, A.H., Morrison, J.L., Muehrcke, P.C., Kimerling, A.J. and Guptill, S.C. (1995). *Elements of cartography*, 6th edition, New York, John Wiley & Sons.
- Ruiz-Lendínez, J.J. (2012). *Automatización del control de calidad posicional de la cartografía*, Universidad de Jaén (PhD thesis).
- Ruiz-Lendínez, J.J., Ariza-López, F.J. and Ureña-Cámara, M.A. (2016). "A point-based methodology for the automatic positional accuracy assessment of geospatial databases", *Survey Review*, 48(349), pp. 269-277. DOI: 10.1179/1752270615Y.0000000030.
- Schut, P. (2007). *OpenGIS® Web Processing Service*. Wayland. Available at: <http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=24151>.
- Servigne, S., Lesage, N. and Libourel, T. (2006) "Quality components, standards, and metadata", in Devillers, R. and Jeansoulin, R. (eds.) *Fundamentals of spatial data quality*, ISTE, pp. 179-210. DOI: 10.1002/9780470612156.ch10.
- Tong, X., Liang, D. and Jin, Y. (2014). "A linear road object matching method for conflation based on optimization and logistic regression", *International Journal of Geographical Information Science*, Taylor & Francis, 28(4), pp. 824-846. DOI: 10.1080/13658816.2013.876501.
- Xavier, E.M.A. (2017). *Automatic evaluation of geospatial data quality using web services*, Universidad de Jaén (PhD thesis).
- Xavier, E.M.A., Meyer, W. and Lunardi, O.A. (2014). "Banco de dados geográficos do Exército Brasileiro: arquitetura e resultados", in *V Jornadas Ibéricas de Infra-estruturas de Dados Espaciais*, Lisboa, Portugal.
- Xavier, E.M.A., Meyer, W.S. and Lunardi, O.A. (2015a). "Aplicações, tendências e desafios em infraestruturas de dados espaciais", *Bahia Análise & Dados*, 25(4), pp. 699-714.

- Xavier, E.M.A.; Ariza-López, F.J. and Ureña-Cámara, M.A. (2015b). “Web service for positional quality assessment: the WPS tier”, in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5*, La Grande Motte, France, pp. 257-262. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-257-2015.
- (2015c). “WPS for positional quality control applying the method proposed in UNE 148002”, *VI Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales*. Sevilla, Spain.
- (2016a). “A survey of measures and methods for matching geospatial vector datasets”, *ACM Computing Surveys*, 49(2), p. Article 39. DOI: 10.1145/2963147.
- (2016b). “Using third party data to update a reference dataset in a quality evaluation service”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B4*. Prague, Czech Republic, pp. 55-61. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-55-2016.
- (2017). *MatchingLand, a geospatial data testbed for the assessment of matching methods*, 4, pp. 170-180. DOI: 10.1038/sdata.2017.180.

Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del Ecuador utilizando tecnología LiDAR aerotransportada

Xavier Molina S.*

Mercedes Farjas A.**

Juan Carlos Ojeda M.**

Recibido 30 de junio de 2018; aceptado 18 de septiembre de 2018

Abstract

Estimating biomass of terrestrial vegetation in tropical forest is not only a rapidly expanding research issue, but also a subject of high interest for reducing carbon emissions associated with deforestation and forest degradation (REDD+). The above-ground carbon density estimates (ACD) based on field inventories and airborne sensors, especially LiDAR sensors have led to a substantial progress in large-scale mapping of forest carbon stocks. However, these carbon maps have uncertainties generally associated with the calibration of the regression model used to produce these maps.

This work establishes a methodology for calibrating and validating a general ACD estimation model using LiDAR in Ecuador's Yasuni National Park. The size and location of the plots are considered in the model calibration phase as well as the influence of topography and spatial distribution of biomass. For the adjustment and validation of the model a stratified sampling scheme by topographic positions (valley, slope and ridge) is proposed. The validation of the general model for the study area showed values of RMSE= 5.81 Mg C ha⁻¹, R²= 0.94 and bias= 0.59, while considering the topographical positions, the model showed values of RMSE= 1.67 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 and bias= 0.23 for the valley; RMSE= 3.13 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 and

* Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), Seniergues E-4 676 y Gral. Telmo Paz y Miño, El Dorado, Quito, Ecuador, correo electrónico: xavier.molina@igm.gob.ec

** Universidad Politécnica de Madrid (UPM), c/Ramiro de Maeztu,7, Madrid 28040, España, correos electrónicos: m.farjas@upm.es; juancarlos.ojeda@upm.es

bias= - 0.34 for the slope; and RMSE= 2.33 Mg C ha⁻¹, R²= 0.97 and bias= 0.74 for the ridge.

The results show that the stratified sampling methodology taking into account topographic positions, effectively calibrates the general model with field estimates of ACD, reducing RMSE and bias. The results show the potential of LiDAR data to characterize the vertical structure of vegetation in a highly diverse forest, allowing accurate estimates of ACD, and knowing continuous spatial patterns of biomass distribution and carbon stocks in the study area.

Key words: forest carbon density, LiDAR, topographic habitats, stratified sampling, tropical forest.

Resumen

La estimación de la biomasa de la vegetación terrestre en bosque tropical es un tema de gran interés para reducir las emisiones de carbono asociadas a la deforestación y la degradación forestal (REDD+). Las estimaciones de densidad de carbono sobre el suelo (ACD) en base a inventarios de campo y datos provenientes de sensores aerotransportados, en especial con sensores LiDAR, han conducido a un progreso sustancial en el cartografiado a gran escala de las reservas de carbono forestal. Sin embargo, estos mapas de carbono tienen incertidumbres considerables, asociadas generalmente al proceso de calibración del modelo de regresión utilizado para producir los mapas.

En este estudio se establece una metodología para la calibración y validación de un modelo general de estimación de ACD usando LiDAR en el Parque Nacional Yasuní en Ecuador. En el proceso de calibración del modelo se considera el tamaño y la ubicación de las parcelas, la influencia de la topografía y la distribución espacial de la biomasa. Para el ajuste y validación del modelo se propone un esquema de muestreo estratificado por posiciones topográficas (valle, ladera y cima). La validación del modelo general para toda la zona de estudio presentó valores de RMSE= 5.81 Mg C ha⁻¹, R²= 0.94 y sesgo= 0.59, mientras que, al considerar las posiciones topográficas, el modelo presentó valores de RMSE= 1.67 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 y sesgo= 0.23 para el valle; RMSE= 3.13 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 y sesgo= - 0.34 para la ladera; y RMSE= 2.33 Mg C ha⁻¹, R²= 0.97 y sesgo= 0.74 para la cima.

Los resultados muestran el potencial de los datos LiDAR para caracterizar la estructura vertical de la vegetación en un bosque altamente diverso, permitiendo realizar estimaciones precisas de ACD, y conocer patrones espaciales continuos de la distribución de la biomasa aérea y del contenido de carbono en la zona de estudio.

Palabras clave: Densidad de carbono forestal, LiDAR, hábitats topográficos, muestreo estratificado, bosque tropical.

Resumo

A estimativa de biomassa da vegetação terrestre em bosque tropical é um tema de grande interesse para reduzir as emissões de carbono associadas ao desmatamento e a degradação florestal (REDD+). As estimativas de densidade de carbono sobre o solo (ACD) com base em inventários de campo e dados provenientes de sensores aerotransportados, em especial com sensores LiDAR, têm conduzido a um progresso substancial na cartografia de grande escala das reservas de carbono florestal. Entretanto, estes mapas de carbono têm incertezas consideráveis, associadas geralmente a processo de calibração do modelo de regressão utilizado para produzir os mapas.

Neste estudo se estabelece uma metodologia para a calibração e validação de um modelo geral de estimação de ACD usando LiDAR no Parque Nacional Yasuní no Equador. No processo de calibração do modelo se considera o tamanho e a localização das parcelas, a influência da topografia e a distribuição espacial da biomassa. Para o ajuste e validação do modelo se propõe um esquema de amostragem estratificada por posições topográficas (vale, encosta e topo). A validação do modelo geral para toda a zona de estudo apresentou valores de RMSE= 5.81 Mg C ha⁻¹, R²= 0.94 e viés= 0.59, enquanto que, ao considerar as posições topográficas, o modelo apresentou valores de RMSE= 1.67 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 e viés= 0.23 para o vale; RMSE= 3.13 Mg C ha⁻¹, R²= 0.98 e viés= - 0.34 para a encosta; e RMSE= 2.33 Mg C ha⁻¹, R²= 0.97 e viés= 0.74 para o topo.

Os resultados mostram o potencial dos dados LiDAR para caracterizar a estrutura vertical da vegetação em bosque altamente diverso, permitindo realizar estimações precisas de ACD, e conhecer padrões espaciais contínuos da distribuição da biomassa aérea e do conteúdo de carbono na zona de estudo.

Palavras chave: *Densidade de carbono florestal, LiDAR, habitats topográficos, amostragem estratificada, bosque tropical.*

Introducción

Los bosques tropicales son importantes reservorios de carbono y biodiversidad, y la caracterización de la distribución espacial de su biomasa aérea (AGB) es un requisito previo para el entendimiento de la dinámica del ciclo de carbono en el tiempo. Se requieren estimaciones exactas de AGB y de los cambios en las existencias de carbono resultado de las actividades humanas para reducir las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal (REDD+) para contribuir con los esfuerzos en curso para la mitigación del cambio climático (Angelsen, 2008). En este marco, los bosques tropicales desempeñan un papel vital en el ciclo global del carbono, pero la cantidad de carbono que contienen y su distribución siguen siendo inciertas (Chave *et al.*, 2005). Durante la última década, la estimación de las reservas

de captación de carbono de los bosques tropicales ha evolucionado a partir de una actividad basada en gran medida en los inventarios de campo (Malhi *et al.*, 2006), hacia un enfoque asistido por teledetección aérea y espacial (Asner *et al.*, 2010).

Las aplicaciones forestales requieren de cartografía de alta precisión que permitan entender las funciones y la dinámica de los bosques, su biodiversidad y el contenido de carbono en la vegetación; especialmente en zonas de extrema fragilidad y alta heterogeneidad como es el caso de los bosques tropicales. Dentro de este campo de estudio, el potencial de LiDAR para identificar y representar el bosque fue reconocido en literatura publicada hace varios años atrás, cuando Arp *et al.*, (1982) lo utilizaron para cartografiar bosques en América Central. El Servicio Forestal Canadiense realizó estudios de perfiles con altímetro láser para caracterizar la altura y la cobertura del dosel arbóreo en masas forestales (Aldred y Bonnor, 1985). A principios de la década de los noventa, la NASA empezó a utilizar sistemas de escaneo de onda continua de huella mediana y grande para realizar mediciones verticales de estructura de vegetación en bosques (Dubayah y Drake, 2000). También ha sido utilizado para la caracterización vertical de la estructura forestal (Zimble *et al.*, 2003), la detección de cambios en la vegetación (Yu *et al.*, 2004), la estimación de parámetros forestales para la generación de modelos de propagación de incendios forestales (Erdody y Moskal, 2010), la determinación de modelos del terreno en áreas boscosas (Kraus y Pfeifer, 1998), la extracción de unidades de gestión forestal basados en sensores remotos en bosques tropicales (Hou *et al.*, 2011), y para la caracterización de áreas forestales en regiones tropicales usando OBIA (Dupuy *et al.*, 2013), entre otras aplicaciones.

La tecnología LiDAR ha demostrado ser útil para estimar patrones de densidad de carbono; sin embargo, la precisión y la generalidad de las calibraciones entre las predicciones de densidad de carbono sobre el suelo asistidas por LiDAR y las estimaciones basadas en técnicas de inventario de campo deben incrementarse a fin de hacer el cartografiado de carbono de los bosques tropicales más accesible (Asner y Mascaró, 2014). Los enfoques más comunes para predecir AGB con datos LIDAR se basan en modelos de regresión que vinculan métricas LiDAR a estimaciones de biomasa en parcelas de inventario forestal. El modelo resultante se utiliza entonces para estimar AGB sobre áreas más grandes.

Área de estudio

La zona geográfica en la que se realiza la investigación, es una parcela de 50 hectáreas localizada en 0° 41' de latitud sur y 76° 24' longitud oeste, al sur del río Tiputini, dentro del Parque Nacional Yasuní en Ecuador (Figura 1). En este parque se concentra una proporción considerable de las especies existentes en bosques tropicales de la Amazonía occidental, convirtiéndolo en uno de los espacios naturales de más alta biodiversidad del mundo (Bass *et al.*, 2010). Debido a esta particularidad y con el fin

de investigar cómo se mantiene la alta diversidad de árboles de Yasuní y la extrema rareza de sus especies, en 1995 la Universidad Católica del Ecuador, junto con el Instituto Smithsonian de Estudios Tropicales y la Universidad de Aarhus, seleccionaron una parcela de una extensión de 50 hectáreas en el noroeste del Parque Nacional Yasuní. Esta parcela está asociada a una red mundial de grandes parcelas permanentes CTFS (Center for Tropical Forest Science) con 61 parcelas distribuidas a nivel mundial y dedicadas al estudio de la función de los bosques tropicales y templados y su diversidad (</www.ctfs.si.edu/>).

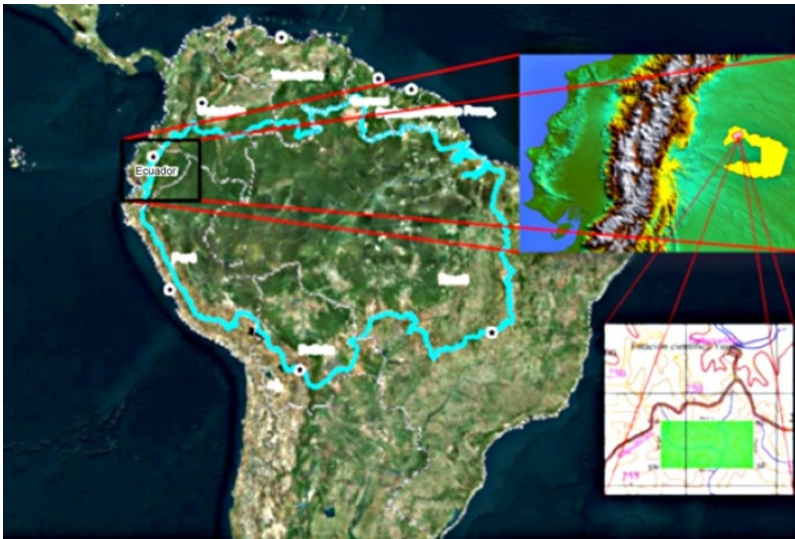


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en la Cuenca Amazónica Occidental. Parcela de 50 ha (rectángulo de color verde) localizada en el Parque Nacional Yasuní, Ecuador (área color amarillo).

La parcela ocupa una superficie de 50 hectáreas y está localizada a una altitud entre los 215 y 249 metros sobre el nivel del mar. La pendiente media de la parcela es del 13%. Dentro de la parcela se encuentran dos ambientes topográficos característicos y dominantes: el valle y la colina. Las zonas de altitud baja incluyen pequeños arroyos permanentes y pantanos temporales asociados a una depresión (que podrán encontrarse frecuentemente inundadas) localizadas al este de la parcela de estudio. La parcela está delimitada al norte y sur por dos crestas compuestas principalmente por colinas de pendiente suave, aunque con pendientes pronunciadas llenas de cárcavas. Las zonas de baja altitud, contienen aluviones marrones o grises, que separan las crestas entre unas y otras (Valencia *et al.*, 2004).

Los estudios de suelos dentro de otras zonas del Parque Nacional Yasuní concluyeron que en lugares de elevación alta, la mayoría de suelos son arcillosos, ácidos, ricos en aluminio y hierro, y carentes de rocas y guijarros (Pitman, 2000). La mayoría de los suelos del Parque Nacional Yasuní se clasifican como ultisoles. El resto de los suelos son propensos a inundaciones, ya sea en los pantanos o en las llanuras de inundación, donde predominan los histosoles.

Datos y Modelo general de estimación de carbono

Censo forestal de la parcela

El censo de la parcela de estudio fue realizado entre los años 2002 y 2010. La identificación de árboles siguió una metodología estandarizada utilizada en una red mundial de grandes parcelas forestales (Condit, 1998). Durante estos trabajos de campo fueron etiquetadas, identificadas y localizadas todas las plantas leñosas ≥ 1 cm de diámetro de tallo. Valencia *et al.* (2004) identificaron todos los árboles con diámetro ≥ 1 cm en 25 hectáreas de la parcela de estudio. Hasta el año 2010 se realizaron tres censos de individuos de diámetro ≥ 1 cm en la mitad occidental de la parcela (25 ha) mientras que en el resto de la parcela se realizó un censo de individuos de diámetro < 10 cm y dos censos de individuos de diámetro ≥ 10 cm. En el censo de 25 hectáreas se identificaron 1 104 morfoespecies entre 152 353 individuos mientras que en las 50 hectáreas se censaron 341 339 individuos.

Se dispuso de mediciones directas del diámetro del tronco a la altura de pecho de todos los individuos de la parcela de 50 hectáreas, y datos de densidad de madera (gravedad específica) tomados de literatura especializada y de mediciones directas en el entorno de la parcela o áreas del PNY (Valencia *et al.*, 2009). En estos censos no se realizaron mediciones de alturas de los árboles debido al dosel denso y cerrado de la zona.

La elevación media del dosel en la parcela es de 18-25 metros. También se encuentran árboles emergentes de hasta 40 m de altura y en escasas ocasiones árboles de 50 m de altura. El mayor número de especies de árboles tenían un dosel cuyo tamaño medio tenía una altura de 10 a 20 m, con presencia de árboles de menor tamaño en el sotobosque con alturas máximas de 5-10 m. Las especies de árboles pequeños dominantes en el sotobosque eran de los géneros *Matisia* y *Rinorea*, mientras que las especies de dosel importantes fueron las *Iriartea deltoidea* y *Eschweilera coriácea* (Valencia *et al.*, 2004b).

Modelo general para estimación de biomasa con variables medidas en campo

Las estimaciones de biomasa de los bosques tropicales están limitadas por el conocimiento de la alometría de árboles tropicales. Su extrema diversidad de especies de árboles en general impide que se desarrollen alometrías de especies específicas, por lo que generalmente se aplican relaciones generales. La precisión para el cálculo del

stock de carbono depende de la disponibilidad de modelos alométricos fiables que permitan inferir la biomasa aérea de los árboles en bosque tropical a partir de datos de inventario forestal (Chave *et al.*, 2005, 2014). Por la imposibilidad de desarrollar relaciones alométricas para un área específica de interés, es común utilizar ecuaciones alométricas ya existentes. Debido a la gran cantidad de estudios que documentan tales relaciones (Feldpausch *et al.*, 2012), es importante identificar correctamente las ecuaciones más representativas.

Para la estimación alométrica de la biomasa aérea, se aplicó el enfoque general de Chave *et al.* (2014). Este modelo (Ecuación 1) se usa en aquellos casos en los que no se cuenta con mediciones de la altura total de los árboles, e incorpora variables como diámetro del tronco, densidad de la madera, y la variable E . Este modelo mejora las predicciones de biomasa propuestos en Chave *et al.* (2005).

$$AGB_{est} = \exp[-1.803 - 0.976E + 0.976 \ln(\rho) + 2.673 \ln(D) - 0.0299[\ln(D)]^2] \quad (1)$$

Donde D representa el diámetro del tronco a la altura de pecho en cm, y ρ es la densidad de madera en g cm^{-3} de cada árbol. La relación genérica entre el valor de biomasa total sobre el suelo y las características forestales del área de estudio, depende linealmente de una variable de estrés bioclimático (E), que a su vez depende de índices de variabilidad de temperatura, del índice de precipitaciones, y de la intensidad de la sequía.

Con los datos recogidos en el censo y el valor del parámetro E en el Parque Nacional Yasuní (-0.0228121), se calculó la cantidad de biomasa sobre el suelo (en unidades de Mg C ha^{-1}), de todos los individuos existentes en la parcela. La sumatoria de las estimaciones en cada árbol, nos dio el valor total de biomasa sobre el suelo para toda la parcela.

Determinación del tamaño de la parcela para el análisis de estimación de carbono

Es necesario establecer parcelas de gran tamaño para realizar estudios de dinámica del bosque porque abarcan poblaciones importantes de la mayoría de las especies de árboles en la comunidad, especialmente en bosques tropicales (Condit *et al.*, 2000). Hay una tendencia a que los errores en las estimaciones de biomasa disminuyan con el aumento de tamaño de la parcela, ya que parcelas grandes reducen la probabilidad de los efectos de borde, que se producen cuando el dosel de los árboles se encuentra a lo largo de los límites de la parcela. También hay una disminución de errores en general, porque las parcelas grandes capturan una cantidad adecuada de la variabilidad estructural en el campo (Chave y Condit, 2004). Una compilación de investigaciones publicadas sobre estimaciones de biomasa sobre el suelo usando LiDAR (Zolkos *et al.*, 2013) concluye que la incertidumbre se acerca al 10% cuando el tamaño de la parcela se aproxima a 1 ha. Las estimaciones de biomasa sobre el suelo a escalas espaciales por debajo de 1 ha están dominadas por la incertidumbre, por los

efectos de corte de parcela y por las diferencias en las características de los sensores (Mascaro *et al.*, 2011). Se admite que escalas espaciales, típicamente del orden de 1 ha, dan resultados más precisos y son más adecuadas en estudios para escalas más finas (Meyer *et al.*, 2013).

Tomando en cuenta los hallazgos de las investigaciones mencionadas, el diseño de muestreo para el análisis fue un cuadrículado regular de subparcelas de 1 ha de superficie cada una de ellas (Figura 2), que permitió capturar el rango de variación de la estructura forestal en la zona de estudio. Las coordenadas X, Y de la esquina SW obtenidas en el levantamiento planimétrico realizado en la parcela de estudio (Figura 3) se usaron como punto de partida; de este modo las subparcelas quedaron georreferenciadas y numeradas de 1 a 50 comenzando en la esquina inferior izquierda.



Figura 2. Sistema de cuadrículado regular de subparcelas de 1 ha de superficie, utilizado para el cálculo de la biomasa de la zona de estudio e identificación de las parcelas para el ajuste (trama horizontal roja) y validación (trama vertical verde).

Geoposicionamiento y levantamiento planimétrico de la parcela de estudio

Para determinar con precisión submétrica los vértices de la parcela de estudio, y relacionar con la máxima exactitud la información del censo con los datos obtenidos mediante el sistema LiDAR aerotransportado, se realizó un levantamiento sobre la parcela de estudio. El Sistema de Referencia Horizontal utilizado en este levantamiento fue el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS, Ecuador), compatible con el sistema de posicionamiento por satélite GPS.

Para el levantamiento planimétrico se implantaron 4 vértices geodésicos (NW-1, NW-2, NE-1, NE-2), que sirvieron de línea base (Figura 3), se utilizó la tecnología GNSS para determinar su ubicación. En la observación se utilizó el vértice geodésico GNSS “Y-NPF”, que forma parte de la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE). Esta red se encuentra enlazada a SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) - ITRF94 (International Terrestrial Reference Frame), época de referencia 1995.4, que como se ha indicado es un marco de referencia compatible con el sistema de posicionamiento satelital GNSS.

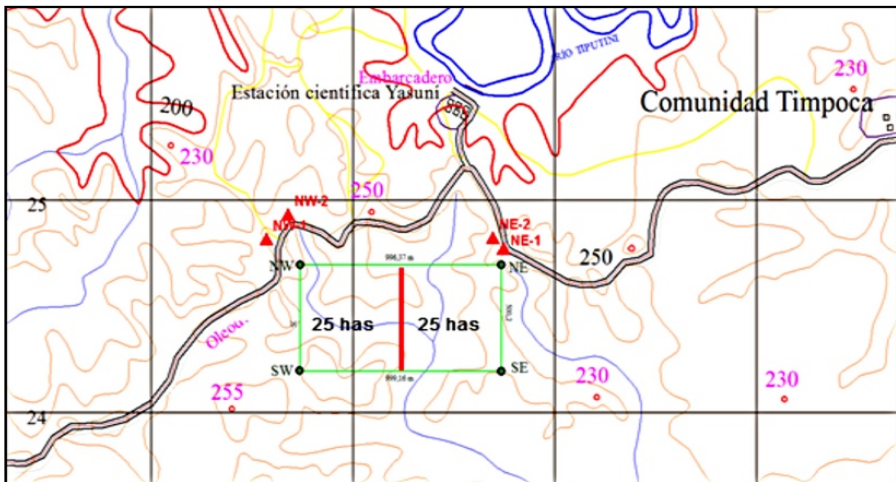


Figura 3. Ubicación de los 4 puntos GNSS y las 4 esquinas de la parcela; Mapa base: C.T Rio Tivacuno, 1:50.000, IGM.

La determinación de las coordenadas de los vértices geodésicos se realizó por el método de posicionamiento GPS estático diferencial de fase, utilizando receptores doble frecuencia marca TRIMBLE, modelo R8, que permiten la medida de líneas base hasta 200 kilómetros, con una precisión de $\pm 0.005m + 1 \text{ ppm}$. Para el procesamiento de los datos GPS se utilizó el software de procesamiento TRIMBLE BUSINESS CENTER (TBC) Versión 2.5. Para el procesamiento de cada vector GPS, se fijó la precisión horizontal de $< 0.050 m + 1 \text{ ppm}$, precisión vertical $< 0.100m + 1 \text{ ppm}$.

Posteriormente, se realizaron las observaciones necesarias para calcular las coordenadas de las 4 esquinas de la parcela (Tabla 1), mediante una estación total TRIMBLE modelo S3, con una precisión de 2".

Tabla 1
Coordenadas UTM ZONA 18 sur de las esquinas de la parcela de estudio

<i>Esquinas parcela</i>	<i>Este (m)</i>	<i>Norte (m)</i>	<i>Prec. (m)</i>	<i>Alt. Elip.</i>
NW	343,737.794	9,924,696.411	0.050	249.310
NW	343,735.023	9,924,196.086	0.050	252.792
NE	344,733.085	9,924,695.236	0.050	244.899
NE	344,734.085	9,924,195.180	0.050	252.074

Fuente: Elaboración de los autores.

Toma de datos con sensor LiDAR aerotransportado

Los datos LiDAR fueron colectados en mayo de 2014, la plataforma aérea utilizada fue una avioneta CESSNA 172 modelo Skyhawk que permite cubrir grandes extensiones de terreno a bajas altitudes y velocidades bajas. El equipo LiDAR utilizado fue un Optech ALT Gemini multiretorno. Los datos y configuración del vuelo y equipo se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2
Configuración del vuelo y equipo LiDAR

<i>Datos del vuelo</i>		<i>Configuración LiDAR.</i>	
Altitud por encima del suelo (m)	781.25	Frecuencia de repet. de pulso (khz)	66
Distancia entre líneas de vuelo (m)	203.89	Frecuencia de escaneo (Hz)	40
Superposición	50 %	Angulo de escaneo / FOV	± 15°
Velocidad (m/s)	56.6	Densidad nominal de pulsos por m ²	5.08
Líneas de vuelo	16	Ancho de barrido (m)	407.78
		Número de retornos	4 retornos
		Número de ecos o pulso	2
		Láser beam divergence (IFOV)	0.8
		Espaciado entre puntos (m)	0.24
		Densidad de puntos por m ²	19.4

Fuente: Elaboración de los autores.

En la parcela de 50 hectáreas se registraron 9,603.411 pulsos en total, si bien el número de retornos fueron 4, el 89.17 % de los datos LiDAR registrados (8,563.795) pertenecieron al primer retorno. Este hecho puede ser explicado por la altura y densidad de la vegetación en la zona de estudio.

Procesamiento de los datos LiDAR

La cuantificación de la biomasa sobre el suelo (AGB) depende de las relaciones entre métricas LiDAR y estimaciones de la biomasa a nivel de parcela a partir de mediciones de campo y ecuaciones alométricas (Zolkos *et al.*, 2013). La estimación de la altura del dosel forestal utilizando datos LiDAR depende de una representación exacta de la superficie del suelo en los modelos digitales del terreno (MDT). Para los estudios forestales en particular, la tecnología LiDAR es capaz de caracterizar tanto terreno y la estructura de la vegetación de manera efectiva. Sin embargo, cualquier error en el MDT se propaga y afecta a la precisión de las métricas derivadas de la vegetación (Tinkham *et al.*, 2012) y modelos de altura de dosel.

Los datos LiDAR obtenidos se normalizaron a la superficie del suelo a fin de expresar los retornos en términos de alturas sobre el suelo y se recortaron en forma de malla de 100 m x 100 m usando el software LAStools. A continuación, utilizando el programa FUSION, se calculó un conjunto de datos estadísticos a partir de la nube de puntos LiDAR de cada una de las parcelas de 1 ha y para todo el grupo de parcelas de muestreo (50 has). Estos datos son métricas descriptivas de alturas obtenidas con LiDAR como la mediana, la moda, valores máximos y mínimos, el rango intercuartílico, los distintos percentiles y cuartiles entre otros.

Estas métricas fueron utilizados para relacionar la nube de puntos con la información alométrica del inventario de parcela de campo (diámetro del tronco, área basal, densidad de madera) y para el cálculo de biomasa sobre el suelo calculado con fórmula propuesta por Chave *et al.* (2014).

Metodología de calibración y ajuste del modelo general

Las mediciones con LiDAR producen una cobertura detallada de la altura y métricas tridimensionales del dosel que se pueden correlacionar con el área basal, dada la naturaleza volumétrica de las mediciones en 3-D (Drake *et al.*, 2003). La mayoría de los estudios se han centrado hasta el momento en bosques de coníferas y plantaciones forestales en zonas templadas. En esta investigación se analizó esta correlación en los bosques tropicales Amazónicos occidentales que contienen mucha diversidad florística (Bass *et al.*, 2010).

Modelo general de estimación de densidad de carbono sobre el suelo (ACD)

Al igual que Asner *et al.* (2012), consideramos que existen tres factores estructurales básicos que describen la cantidad de carbono almacenado en los bosques tropicales: área basimétrica o basal (AB), la altura de los árboles (H) y la densidad específica de la madera (WD). La información obtenida a través de la tecnología LiDAR aerotransportada, está relacionada con las principales variables de masa forestal mediante el ajuste de modelos estadísticos, pudiendo estudiarse variables tales como la altura dominante, el área basimétrica, y la biomasa.

Para eso es necesario tener dos fuentes de datos: 1) Mediciones dasométricas en parcelas de campo convencionales geoposicionadas con muy alta precisión (submétricas) para garantizar que todas las fuentes de datos disponibles para el estudio coincidan espacialmente; 2) nubes de puntos obtenidos mediante tecnología LiDAR aerotransportada de la zona de estudio, referenciándose de este modo la posición geométrica de la nube de puntos con la información dasométrica de las parcelas. Errores en la identificación y la baja precisión de las variables estimadas, son a menudo atribuidas a discrepancias entre el co-registro de las parcelas de referencia en tierra y la información LiDAR (Næsset, 2002).

Alometría conjunta de parcela

El enfoque de alometría conjunta de parcela para calibración con LiDAR propuesta por Asner *et al.* (2012), sigue la teoría general de alometría de árbol (Chave *et al.*, 2005), y refleja las propiedades de la estructura forestal de la parcela completa en conjunto, en lugar de las propiedades de cada organismo en particular. Este enfoque radica en un modelo universal simplificado que demuestra que la biomasa seca de árboles y por lo tanto el contenido de carbono, que es ~ 48% de la biomasa seca en peso (Martin y Thomas, 2011), puede estimarse a partir de mediciones de alturas obtenidas con datos LiDAR y otras variables medidas en campo (Asner *et al.*, 2012).

El modelo universal utilizado en este estudio (Ecuación 2) ha sido calibrado y validado experimentalmente en cuatro regiones tropicales: Perú, Panamá, Madagascar y Hawaii. El interés de esta investigación es continuar con la validación de este modelo, evaluando si es posible su implementación en otras regiones geográficas o queda relegado a la zona de estudio de la que surgió. El modelo universal se define de la siguiente manera:

$$ACD = aTCH^{b1} AB^{b2} WD_{BA}^{b3} \quad (2)$$

Donde la densidad de carbono sobre el suelo (ACD) corresponde al valor de la biomasa sobre el suelo obtenido con la Ecuación 1 y multiplicado por el factor 0.48. MCH es la altura media al tope del dosel obtenida con LiDAR, AB es el área basal medida en campo, y WD_{BA} es la densidad de la madera promedio (promedio ponderado con respecto al área basal para cada parcela de 1 ha).

Selección de las subparcelas para el ajuste y validación del modelo general

Los resultados obtenidos por Réjou-Méchain *et al.* (2014) refuerzan la importancia de la topografía como un factor que debe ser tomado en cuenta en el diseño de los inventarios forestales y las calibraciones cuando utilizamos sensores remotos. El estudio sugiere que el muestreo en general, debe ser estratificada por hábitats topográficos (por ejemplo, crestas o cimas, valles y laderas), sobre todo si las estimaciones consideran un enfoque basado en el terreno. Por el contrario, cuando la finalidad del

muestreo de campo es calibrar productos de detección remota, las zonas topográficamente complejas se deben evitar para reducir al mínimo los errores de muestreo asociados a la variabilidad espacial local. En los inventarios forestales y los sistemas de calibración, una importante fuente de error es la distribución desigual y no aleatoria de parcelas en escalas espaciales amplias, especialmente en zonas tropicales.

Para la selección de las subparcelas para el ajuste y validación del modelo en nuestro estudio, se consideró la distribución espacial y hábitats topográficos dentro de la parcela de 50 ha (valle, ladera y cima). Se utilizaron 32 subparcelas para el ajuste y 18 subparcelas para la validación del modelo (Figura 2). La subparcela No. 2, contiene un remanente de bosque secundario (0.48 ha) resultado de la tala de árboles para la construcción de un antiguo helipuerto abierto en épocas de prospección petrolera en la zona (alrededor del año 1987). Esta subparcela fue considerada en la validación del modelo. En el análisis exploratorio de datos se identificaron dos subparcelas atípicas (la subparcela 36 y la subparcela 50) que contienen los árboles más grandes de la zona. Ambas subparcelas fueron incluidas en la validación del modelo.

Para el ajuste del modelo, se consideraron sólo los árboles ≥ 10 cm de diámetro a la altura de pecho, ya que los árboles < 10 cm generalmente contribuyen con menos del 5% de la biomasa aérea total (AGB) en los bosques tropicales maduros (Chave *et al.*, 2003), y es el valor de corte usual en las medidas de inventario forestal y estimaciones de biomasa usando LiDAR (Feldpausch *et al.*, 2011). Para cada una de las subparcelas, se elaboró una tabla con datos del número de árboles, código de especie, diámetro del árbol, ubicación espacial (X,Y), área basal, valor de biomasa estimada (Mg_{ha}-1) a partir de la fórmula propuesta por Chave *et al.*, (2014), densidad de madera por especie y la densidad de madera ponderado por el área basal (gr_{cm}-3) para cada uno de los individuos en las subparcelas.

Ajuste del modelo local a partir del modelo general de cálculo de densidad de carbono sobre el suelo (ACD) para la parcela de estudio

El modelo universal (Ecuación 2) se ajustó mediante regresión lineal múltiple por el método de mínimos cuadrados, transformando logarítmicamente las variables *ACD*, *TCH*, *AB*, y *WD_{BA}* en la forma:

$$\ln(ACD) = \ln a + b_1 \ln(TCH) + b_2 \ln(BA) + b_3 \ln(WD_{BA}) \quad (3)$$

Se utilizaron los datos LiDAR y la información dasométrica de 32 subparcelas. El ajuste y diagnóstico del modelo se lo realizó con el software R Commander (Fox, 2005).

Modelo final de cálculo de ACD

Luego del análisis y ajuste del modelo general propuesto, el resultado del modelo matemático local que mejor se ajusta es el siguiente:

$$\ln ACD = \ln(0.768) + 0.140 \ln(AB) + 0.983(WD_{BA}) \quad (4)$$

Los estadísticos obtenidos para cuantificar la bondad de las estimaciones son: el error cuadrático medio (RMSE) igual 0.03182 y el coeficiente de determinación $R^2 = 0.966$ que determina que porcentaje de la varianza de la variable dependiente es explicado por el modelo de regresión.

A continuación, se revirtió el modelo final ya que nos interesa el parámetro ACD por ha y no su \ln y se multiplicó por el factor de corrección (FC) para eliminar el sesgo producido (subestimación) por la transformación logarítmica en el modelo (Baskerville, 1972). El factor de corrección está dado por $CF = e^{MSE/2}$, donde MSE es el error cuadrático medio del modelo de regresión. Para este caso es igual a 1.00044. La ecuación quedó determinada de la siguiente manera:

$$ACD = 2.15813 * TCH^{0.14015} BA^{1.2292} WD_{PROMEDIO}^{0.9839} \quad (5)$$

Validación del modelo local para la estimación de densidad de carbono sobre el suelo (ACD)

Un procedimiento riguroso de validación del modelo consiste en verificar los resultados con una muestra independiente de la utilizada para construirlo. Para este estudio se realizó la validación del modelo aplicándola a 18 subparcelas que fueron seleccionadas para tal fin. Al aplicar el modelo resultante (Ecuación 5) a las subparcelas de validación, se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 4.

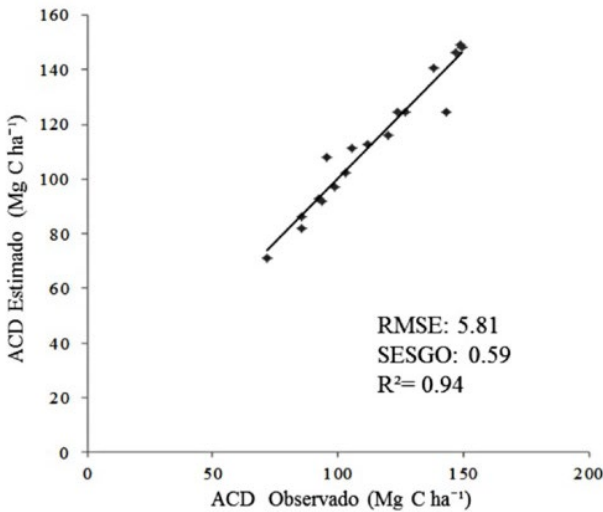


Figura 4. Validación del modelo general de ACD en 18 subparcelas independientes.

Los resultados de la validación directa ponen de manifiesto que las estimaciones de *ACD* usando el modelo general son precisas (RMSE= 5.81 Mg C ha⁻¹), y presentan una alta consistencia con las medidas de campo ($R^2= 0.94$), sin apenas desviaciones sistemáticas (sesgo próximo a 0), recogiendo la variabilidad del ecosistema en la zona de estudio.

Validación del modelo por posiciones topográficas

En la Figura 5 se presenta el desempeño del modelo ajustado para cada una de las posiciones topográficas. Los resultados muestran que el modelo es espacialmente sensible a las variaciones de *ACD* en las 3 posiciones topográficas. La selección de subparcelas para el ajuste del modelo considerando estas posiciones, incide en la precisión de las estimaciones de *ACD* en la zona de estudio. El sesgo en cada posición topográfica proporciona un conocimiento general de cómo las parcelas de campo representan el paisaje. La disminución del sesgo es independiente del número de parcelas de calibración; sólo depende del error de muestreo asociado a estas parcelas, que está determinado en gran medida por el tamaño de la parcela (Réjou-Méchain *et al.*, 2014).

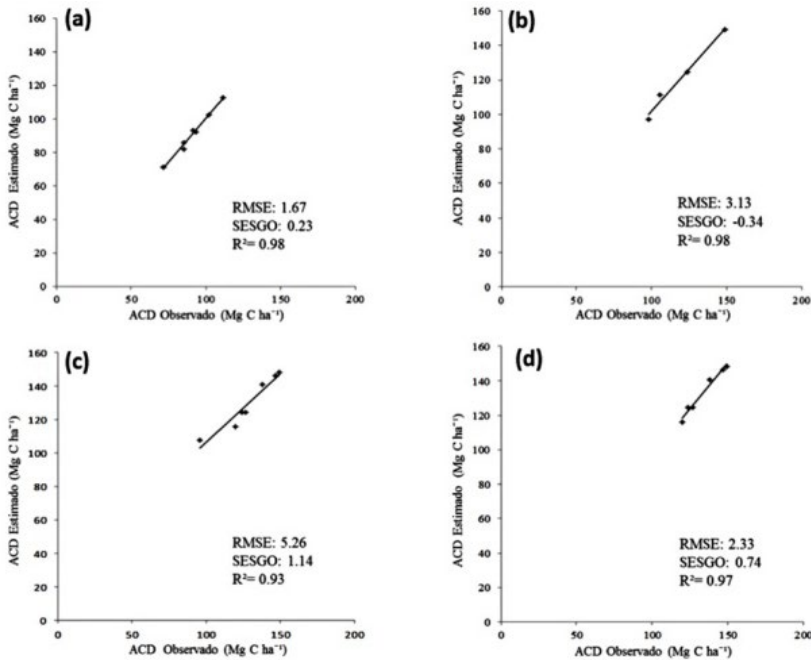


Figura 5. Validación del modelo general de *ACD* por posiciones topográficas en: a) valle; b) ladera; c) cima incluyendo el remanente de bosque secundario; d) cima sin bosque secundario.

La mayor diferencia entre las observaciones de campo y las estimadas por el modelo se presenta en la cima que contiene el remanente de bosque secundario (Figura 5c). Esta diferencia se debe a dos situaciones muy concretas: a) el mayor crecimiento de los árboles del bosque secundario en comparación con los árboles del bosque maduro en la parcela; y b) el tiempo transcurridos entre el censo de árboles y la toma de datos LiDAR. La Figura 5d muestra la validación del modelo sin la parcela 2, donde se puede comprobar la mejora en la precisión del modelo.

Geografía del carbono en la zona de estudio

Los mapas de biomasa y contenido de carbono sobre el suelo de los bosques tropicales son importantes para la conservación de los bosques, ya que constituyen un material básico para la elaboración de políticas de mitigación del cambio climático, y la comprensión del papel que desempeñan los bosques tropicales en el ciclo global del carbono.

Para obtener el mapa de alta resolución de las reservas de carbono en el área de estudio, se aplicó la Ecuación 5 a toda la superficie de cobertura LiDAR utilizando algebra de mapas. La zona total de cobertura LiDAR se dividió en unidades de análisis de 1 ha (malla regular de celdas cuadradas -fishnet), y se calculó el *TCH* (Figura 6) a partir del modelo de digital de superficie normalizado.

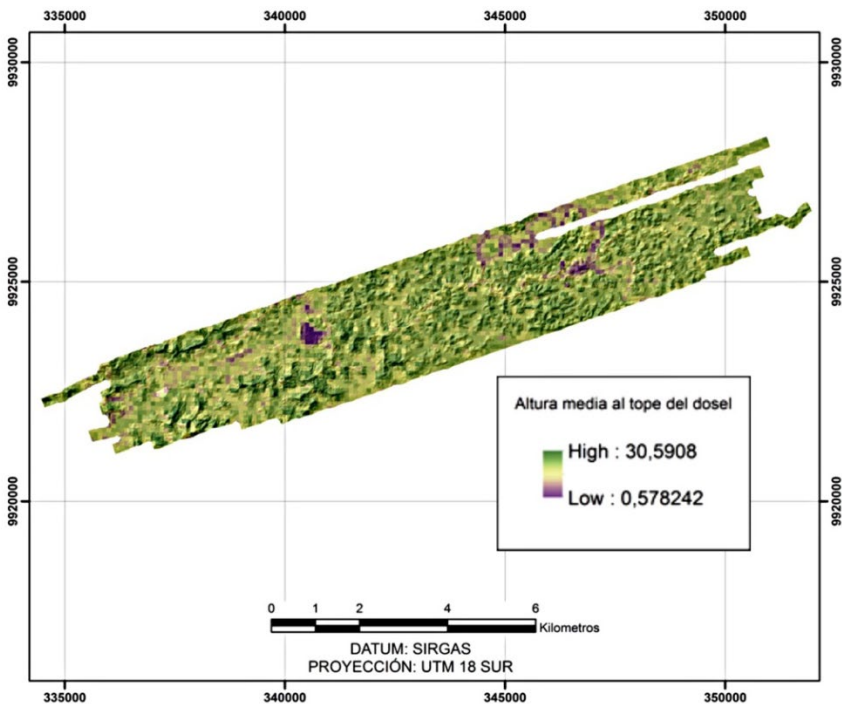


Figura 6. Mapa de altura media al tope del dosel (*TCH*) para la zona de estudio

El mapa resultante de la densidad de carbono sobre el suelo (Figura 7), a pesar de cubrir una pequeña extensión de territorio, es una muestra representativa de la diversidad forestal del Parque Nacional Yasuní, y consecuentemente de una gran parte del bosque tropical amazónico del Ecuador.

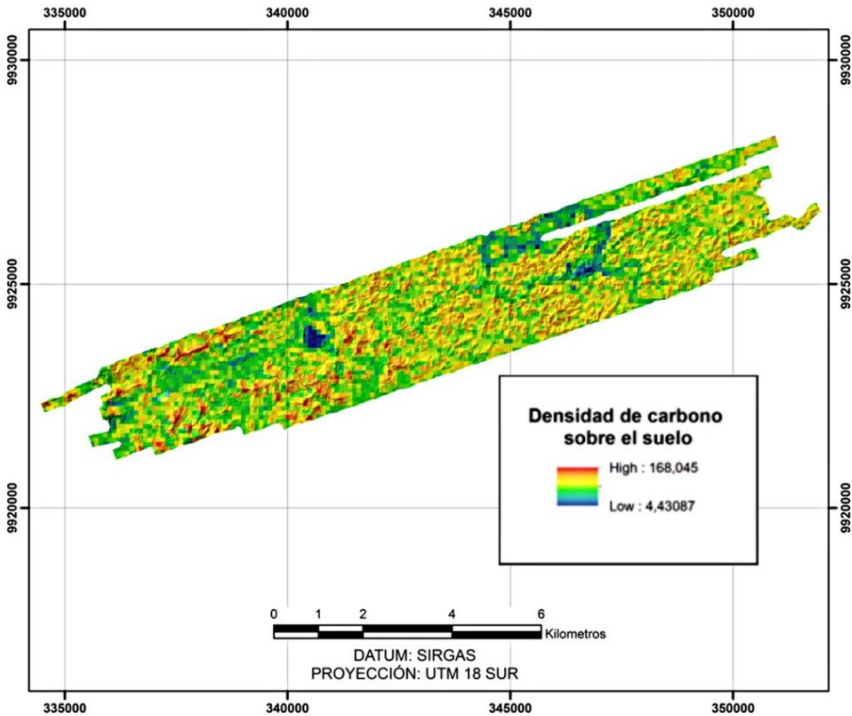


Figura 7. Mapa de densidad de carbono sobre el suelo en la zona de estudio.

Los valores más altos de ACD (168 Mg C ha^{-1}) se localizan en los bosques ubicados en los sitios más elevados (cimas), mientras que las menores densidades de ACD se encuentran en los bosques en los valles (82 Mg C ha^{-1}), y en zonas inundadas, o propensas a inundaciones (47 Mg C ha^{-1}). Las zonas con almacenamiento bajo de carbono se deben probablemente a las condiciones hidrológicas como la anoxia, y posiblemente a cambios en la fertilidad del suelo asociados con el substrato geológico subyacente (Asner *et al.*, 2010). Los resultados obtenidos concuerdan con el estudio realizado por el Ministerio del Ambiente de Perú el año 2014 en la Amazonía Norte del Perú, donde encontraron que las mayores densidades de carbono se localizan al norte del río Napo, en el límite fronterizo con el Ecuador.

Conclusiones

El uso de información proveniente de nuevas tecnologías de captura de datos como el LiDAR aerotransportado, unido a la información de las características biofísicas de los árboles obtenidas en parcelas de campo tácticamente ubicadas y representativas de la diversidad biológica, combinadas con técnicas de modelaje geo-estadístico, han demostrado ser un enfoque consistente para la calibración de datos LiDAR aplicados al estudio del carbono contenido en la biomasa de los bosques tropicales. A través de esta investigación, se comprobó que los sistemas LiDAR aerotransportados son capaces de capturar la variabilidad de la estructura vertical de un bosque tropical de gran biodiversidad en la Amazonía occidental del Ecuador.

La incertidumbre de los resultados obtenidos en estudios realizados hasta el momento, varían desde 17 hasta más de 40 Mg C ha⁻¹ (RMSE) en los trópicos. Estos errores están relacionados con el proceso de calibración (Asner *et al.*, 2010); en esta investigación se lograron reducir estos valores usando técnicas de regresión lineal combinadas con una metodología para determinar la ubicación más adecuada de las parcelas para el ajuste considerando los hábitats topográficos de la zona de estudio.

Para el cálculo de la densidad de carbono sobre el suelo se utilizaron 50 subparcelas de 1 ha de extensión cada una, obteniendo valores de incertidumbre de 5.81 Mg C ha⁻¹ que mejoran los resultados de estudios anteriores y ratifican que usando LiDAR se pueden cartografiar existencias de carbono con ~10% de error y con alta precisión.

El modelo estimado utilizó la densidad de madera promedio por parcela en vez de la densidad de madera ponderado por área basal que utiliza Asner *et al.* (2012), ya que permitió un mejor ajuste como se puede evidenciar en los resultados de las estadísticas de bondad de ajuste.

El modelo estimado en este estudio recoge la variabilidad de la biomasa sobre el suelo de los tres hábitats topográficos de la zona en conjunto: valle, ladera y colina. Se comprobó que existen diferencias hasta del 50% en los valores de biomasa aérea entre hábitats en una variación altitudinal de tan solo 32 metros. Los resultados obtenidos confirman las estimaciones realizadas por Valencia *et al.* (2009). Esta variación de biomasa parece no sólo depender de factores biológicos como la altura, el área basimétrica y la densidad de madera, sino también de la influencia del gradiente de elevación que produciría acumulación de agua en el suelo y la formación de pantanos, que coincide con aquellas zonas de baja pendiente y altitud. Se deben considerar análisis más detallados sobre la influencia de la topografía en las estimaciones de biomasa aérea y que tomen en cuenta un esquema de gradiente, utilizando productos de alta precisión derivados de las mediciones de los sistemas LiDAR en futuras investigaciones.

En el área de estudio y durante el proceso de validación del modelo se identificó subparcelas con muy pocos árboles de dosel emergente dispersos que alcanzaron los

56 m de altura; es de destacar que estos tipos de árboles contienen mucha biomasa aérea y pueden ser fácilmente identificados utilizando la información LiDAR.

Bibliografía

- Aldred, A. y Bonnor, G. (1985). *Application of airborne lasers to forest surveys*, Petawawa National Forestry Institute, vol. PI-X.51.
- Angelsen, A. (2008). *Moving ahead with REDD: issues, options and implications*, Bogor, Indonesia, Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Arp, H. y Tranarg, C. (1982). "Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR [Airborne Profile Recorder], *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 48.
- Asner, G. y Mascaro, J. (2014). "Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric", *Remote Sensing of Environment*, no. 140, pp. 614-624.
- Asner, G.; Mascaro, J.; Muller-Landau, C.; Vieilledent, G.; Vaudry, R.; Rasamoelina, M., *et al.* (2011). "A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping", *Oecologia*, 168(4), pp. 1147-1160 <<http://dx.doi.org/10.1007/s00442-011-2165-z>>.
- Asner, G.; Powell, N.; Mascaro, J.; Knapp, D.; Clark, K.; Jacobson, J. *et al.* (2010). "High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107 (38), pp. 16738-42.
- Baskerville, G. (1972). "Use of logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass", *Canadian Journal of Forest Research*, no. 2, pp. 49-53.
- Bass, S.; Finer, M.; Jenkins, N.; Kreft, H.; Cisneros-Heredia, F.; McCracken, F.; *et al.* (2010). "Global conservation significance of Ecuador's Yasuni National Park", *PloS One*, 5(1), pp. 1-22.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown, S.; Cairns, A.; Chambers, Q.; Eamus, D. *et al.* (2005). "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests", *Oecologia*, 145 (1), pp. 87-99.
- Chave, J.; Condit, S.; Aguilar, A.; Hernandez, S.; Lao, and R. Perez (2004). "Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, no 359, pp. 409-420.
- Chave, J.; Condit, R.; Lao, S.; Caspersen, P.; Foster, B. and Hubbell, S. (2003). "Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama", *Journal of Ecology*, 91(2), pp. 240-252.
- Chave, J.; Réjou-Méchain, M.; Búrquez, A.; Chidumayo, E.; Colgan, M.S.; Delitti, C. *et al.* (2014). "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees", *Global Change Biology*, pp. 1-14.
- Condit, R. (1998). *Tropical forest census plots*. Berlin, Springer-Verlag.

- Condit, R.; Ashton, S.; Baker, P.; Bunyavejchewin, S.; Gunatilleke, S.; Gunatilleke, N. *et al.* (2000). "Spatial patterns in the distribution of tropical tree species", *Science*, 288(5470), pp. 1414-1418.
- Drake, J.; Knox, G.; Dubayah, R.; Clark, B.; Condit, R.; Blair, B. and Hofton, M. (2003). "Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships", *Global Ecology and Biogeography*, 12(2), pp. 147-159.
- Dubayah, R. y Drake, J. (2000). "Lidar remote sensing for forestry", *Journal of Forestry*, 98(6), pp. 44-46.
- Dupuy, S.; Lainé, G.; Tassin, J.; y Sarrailh, J. (2013). "Characterization of the horizontal structure of the tropical forest canopy using object-based LiDAR and multispectral image analysis". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, no. 25, pp. 76-86.
- Erdody, L., y Moskal, M. (2010). "Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels", *Remote Sensing of Environment*, 114(4), pp. 725-737.
- Feldpausch, R.; Lloyd, J.; Lewis, L.; Brienen, W.; Gloor, M.; Monteagudo-Mendoza, A. *et al.* (2012). "Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates", *Biogeosciences*, 9(8), pp. 3381-3403.
- Fox, J. (2005). "The R Commander: A basic-Statistics Graphical User interface to R", *Journal of Statistical Software*, 14 (9), pp. 1-42.
- Hou, Z.; Xu, Q. y Tokola, T. (2011). "Use of ALS, Airborne OR and ALOS AVNIR-2 data for estimating tropical forest attributes in Lao PDR", *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), pp. 776-786.
- Kraus, K., y Pfeifer, N. (1998). "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(4), pp. 193-203.
- Malhi, Y.; Wood, D.; Baker, T.R.; Wright, J.; Phillips, O.L.; Cochrane, T. *et al.* (2006). "The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests", *Global Change Biology*, 12(7), pp. 1107-1138.
- Martin, R. y Thomas, C. (2011). "A reassessment of carbon content in tropical trees", *PloS One*, 6(8), e23533.
- Mascaro, J.; Detto, M.; Asner, G. and Muller-Landau, H. (2011). "Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR". *Remote Sensing of Environment*, 115 (12), pp. 3770-3774.
- Meyer, V.; Saatchi, S.; Chave, J.; Dalling, J.; Bohlman, S.; Fricker, A.; Robinson, C.; Neumann, M. y Hubbell, S. (2013). "Detecting tropical forest biomass dynamics from repeated airborne lidar measurements", *Biogeosciences*, 10, pp. 5421-5438.
- Næsset, E. (2002). "Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data", *Remote Sensing of Environment*, 80(1), pp 88-99.

- Pitman, N. (2000). *A large-scale inventory of two Amazonian tree communities*, Duke University.
- Réjou-Méchain, M.; Muller-Landau, C.; Detto, M.; Thomas, C.; Le Toan, T.; Saatchi, S. *et al.* (2014). "Local spatial structure of forest biomass and its consequences for remote sensing of carbon stocks", *Biogeosciences Discussions*, 11, pp. 5711-5742.
- Tinkham, T.; Smith, S.; Hoffman, C.; Hudak, T.; Falkowski, J.; Swanson, E. and Gessler, P. (2012). "Investigating the influence of LiDAR ground surface errors on the utility of derived forest inventories", *Canadian Journal of Forest Research*, 42, pp. 413-422.
- Valencia, R.; Condit, R.; Foster, B.; Romoleroux, K.; Villa-Munoz, G.; Svenning, J. *et al.* (2004). "Yasuní Forest Dynamics Plot, Ecuador", in E.C. Losos and E.G. Leigh (eds.), "Tropical forest diversity and dynamism: Findings from a large-scale plot network", Chicago, University of Chicago Press, pp. 609-628.
- Valencia, R.; Condit, R.; Muller-Landau, H.; Hernandez, C. y Navarrete, H. (2009). "Dissecting biomass dynamics in a large Amazonian forest plot", *Journal of Tropical Ecology*, 25(5), pp. 473-482.
- Valencia, R.; Foster, B.; Villa, G.; Condit, R.; Svenning, J.; Hernández, C. *et al.* (2004b). "Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador", *Journal of Ecology*, 92(2), pp. 214-229.
- Yu, W.; Hyypä, J.; Kaartinen, H. y Maltamo, M. (2004). "Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning", *Remote Sensing of Environment*, 90(4), pp. 451-462.
- Zimble, A.; Evans, L.; Carlson, C.; Parker, C.; Grado, C. and Gerard, D. (2003). "Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR", *Remote Sensing of Environment*, 87(2), pp. 171-182.
- Zolkos, S.; Goetz, S. and Dubayah, R. (2013). "A meta-analysis of terrestrial above-ground biomass estimation using lidar remote sensing", *Remote Sensing of Environment*, no. 128, pp. 289-298.

Experiencias cognitivas en la interpretación de un mapa dasimétrico de densidad de población para la región Pátzcuaro Zirahuén, Michoacán, México

Jesús Abraham Navarro Moreno*

Recibido 28 de mayo de 2018; aceptado 30 de septiembre de 2018

Abstract

This paper belongs to the communicative paradigm of Cartography. Its objective is to reveal cognitive experiences during the interpretation of a dasymetric map. The problem is posed to pre-grade students, who are close to finish their bachelor's studies in Geography and aim to increase their cartographic skills. Various tests are conducted around five types of experiences recorded in a semi-structured interview. Within the results it is noted that the participants tend to privilege less thoroughness in the resulting map, this is demonstrated through the inspection of their appreciations and their identification efficiency; nevertheless, the method leaves in them assertive messages of its qualities.

Key words: *Cognitive experiences, thematic cartography, map interpretation, dasymetric map.*

Resumen

Este trabajo se inscribe dentro del paradigma comunicativo de la Cartografía. Su objetivo es revelar experiencias cognitivas durante la interpretación de un mapa dasimétrico. El problema es planteado a estudiantes de nivel superior, cercanos a terminar sus estudios de Geografía, que pretenden incrementar sus habilidades cartográficas. Se realizan diversas pruebas en torno a cinco tipos de experiencias registradas en una entrevista semiestructurada. Dentro de los resultados se destaca que los participantes

* Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, correo electrónico: a.navarro@comunidad.unam.mx

son tendientes a privilegiar menor minuciosidad en el mapa resultante, ello se demuestra a través de la inspección de sus apreciaciones y la eficacia de identificación; no obstante, el método deja en ellos mensajes asertivos de sus cualidades.

Palabras clave: *Experiencias cognitivas, cartografía temática, interpretación de mapas, método dasimétrico.*

Resumo

Este trabalho está inserido dentro do paradigma comunicativo da Cartografia. Seu objetivo é revelar experiências cognitivas durante a interpretação de um mapa dasimétrico. O problema é colocado a estudantes de nível superior, próximos a terminar seus estudos de Geografia, que pretendem incrementar suas habilidades cartográficas. Se realizam diversas provas em torno de cinco tipos de experiências registradas em uma entrevista semi-estruturada. Dentro dos resultados se destaca que os participantes são tendenciosos a privilegiar menor minuciosidade no mapa resultante, isso se demonstra através da inspeção de suas apreciações e eficácia de identificação; não obstante, o método deixa mensagens assertivas de sua qualidade.

Palavras chave: *Experiências cognitivas, cartografia temática, interpretação de mapas, método dasimétrico.*

Introducción

El cartografiado dasimétrico ha sido del interés de numerosas investigaciones alrededor del mundo. Se trata de un método que ha buscado brindar información más detallada del espacio geográfico, auxiliándose de información complementaria que aumenta, a su vez, la complejidad en la lectura, no sólo por el cambio de perspectiva en la presentación del fenómeno, sino por la particularidad que puede ser alcanzada en las clasificaciones cuantitativas.

Diversas investigaciones recientes se han enfocado en mostrar rutas metodológicas para la obtención del modelo propuesto y su aproximación estadística a la realidad; ejemplo de ello, son las aportaciones realizadas por Eicher y Brewer (2001), Mennis y Hultgren (2006), Tapp (2010), Sleeter (2013) o Neves, *et al.* (2017).

No obstante, el presente trabajo vira la perspectiva hacia un usuario de la información y trata de indagar en las experiencias cognitivas de un perfil específico: estudiantes de nivel superior que manifiestan interés en incrementar sus habilidades cartográficas. Plantea que las experiencias cognitivas en la interpretación de un mapa dasimétrico, reflejarán que existen preferencias por modelaciones y diseños que contribuyen, en la mente de estos intérpretes, a obtener una imagen más cercana de la dinámica del proceso en el espacio geográfico representado; asimismo, por medio de

la lectura del mapa, emitirán diversos juicios acerca del método, obteniendo una noción de éste que los llevará a reflexionar en su utilidad. Estas expresiones empíricas serán prueba de que el método emite mensajes asertivos de sus cualidades desde que se conoce por primera vez.

El objetivo de este trabajo es revelar diversas experiencias durante la interpretación de un mapa que emplee este método. De esta manera, se desea contribuir a la investigación cartográfica bajo una perspectiva cognitiva que ayude a evaluar qué tan apropiado es el método dasimétrico para su aprehensión por parte de este perfil de usuario específico bajo estudio. Se trata de una investigación de corte cualitativo, donde tanto el método cartográfico, como los propios sujetos, son objeto de investigación.

La temática de modelación del mapa dasimétrico refiere a la densidad de población, que es frecuente en el estudio del método; todo ello se aplica sobre la región Pátzcuaro Zirahuén en Michoacán, México, debido a que en su espacio presenta coberturas del suelo que han sido analizadas en diversos estudios del método dasimétrico.

Los vínculos de la Cartografía con las experiencias cognitivas

En Cartografía, el concepto relativo a la cognición o “lo cognitivo” ha sido vinculado a la obtención de una imagen del espacio geográfico derivada de la lectura de mapas. Estas nociones quedan plasmadas en los textos de Lynch (1960) referentes a los mapas mentales, o de Jameson (1991), quien advierte que la cartografía cognitiva es la forma en que un individuo se genera una idea acerca del mundo social que lo circunda. Bajo estos argumentos, el enfoque cognitivo de la cartografía queda asociado de manera estrecha a los posicionamientos conceptuales de la Geografía de la Percepción.

No obstante, si se asume que dicho concepto refiere a toda facultad de un ser vivo para procesar información a partir de lo que ha percibido, sus experiencias y diversas evaluaciones que le permiten asimilar una información que recibe, entonces la cognición, en materia cartográfica, puede considerar una perspectiva más amplia que contribuye al estudio de los mapas; en este sentido, la lectura cartográfica realizada por un intérprete no sólo hace que éste adquiera una idea del espacio geográfico, sino de la propia representación que le proporcionó la información. Montello (2002) advierte que muchos cartógrafos, indudablemente, han reconocido que los mapas contribuyen a forjar una visión del mundo, y que, incluso, pueden haber entendido que este quehacer incluye la toma de decisiones durante el diseño de los mapas.

Estas reflexiones en torno a la importancia de los criterios de confección y diseño y su impacto en los mapas como instrumentos de cognición, tiene tradición en Cartografía. Puede citarse, como ejemplo, a Eckert (1961) cuando refiere la propiedad de la adecuación de los mapas para un propósito; así también, están las proposiciones

de Robinson *et al.* (1987), DiBiase (1990) o MacEachren (1994) vinculadas al mapa como un instrumento de comunicación, y los razonamientos aducidos por Joly (1979), Wood (1991) o Suavita y Flórez (1992), donde se advierte la importancia de la lectura e interpretación de los mapas.

Obtención del mapa dasimétrico de la región Pátzcuaro Zirahuén

Materiales fundamentales

En este trabajo se utilizó la técnica de las variables relacionadas para la obtención del mapa dasimétrico, compilándose tres informaciones fundamentales. La primera de ellas se refiere a los datos de población, para la cual se tomaron los Principales Resultados por Localidad (ITER), pertenecientes al Censo General de Población y Vivienda 2010, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); esta información consiste en un conjunto amplio de indicadores de población y vivienda a nivel localidad de todo el país, y será la que se tome como referencia para comprobar la aproximación de las modelaciones propuestas.

La segunda información recabada es la división político-administrativa de los territorios de Erongarícuaro, Huiramba, Lagunillas, Pátzcuaro, Quiroga, Salvador Escalante y Tzintzuntzan, que conforman la región Pátzcuaro Zirahuén en Michoacán (CGAP, 2016). A fin de corresponder con la información estadística anterior, se recurrió al Marco Geoestadístico Nacional del INEGI en su versión 2010, que brinda un sistema único y de carácter nacional, donde se referencia la información estadística de los censos y encuestas, vinculada con los lugares geográficos correspondientes. Particularmente, se hizo uso de las Áreas Geoestadísticas Municipales (AGEM) que contienen la extensión territorial integrada de cada uno de los municipios que conforman la división política de las entidades federativas de los Estados Unidos Mexicanos, y están definidos por los límites geoestadísticos (Figura 1).

El último elemento necesario para la generación del mapa dasimétrico es la información auxiliar de contraste; esta información permitirá transitar de los datos básicos originales, con los que se podría hacer un mapa coroplético,¹ a un mapa donde se distingan zonas detalladas de densidad de población. En este sentido, se utilizó la información de la cartografía del INEGI relativa al Conjunto de Datos Vectoriales de

¹ Se reconoce que, desde el posicionamiento soviético y europeo en general, los mapas estadísticos son llamados cartogramas (Raisz, 1948) y no mapas coropléticos. El cartograma, desde el posicionamiento de la cartografía estadounidense, se refiere al tipo de representación que modifica el tamaño y forma de los territorios en función de su valor estadístico, lo que genera anamorfosis. En todo caso, ambas perspectivas (cartograma o mapa coroplético) coinciden en la representación de datos relativizados, no absolutos; puede considerarse, por consiguiente, que el uso de uno u otro término estará asociado con la terminología asumida por la escuela cartográfica. En esta investigación se asumirá el término “mapa coroplético” y sus derivaciones, a fin de corresponder con la mayoría de la literatura generada sobre este tema.

Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000 - Serie V. En el año 2013, se editó la carta E14-1 Morelia, que es referida en esta investigación.



Figura 1. Localización geográfica y conformación territorial de la región Pátzcuaro Zirahuén, Michoacán, México.
Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010b; CGAP, 2016.

Para la preparación de la base de datos final del presente trabajo, la información de áreas urbanas fue modificada de la cartografía original 1:250 000. Dichos polígonos se sustituyeron por los indicados como áreas urbanas del Marco Geoestadístico del INEGI en su versión 2013, correspondiente con el año de edición de la carta E14-1, esto con la finalidad de obtener una cobertura más actual del área que ocupan los espacios urbanos dado su comportamiento dinámico. La base de datos resultante fue depurada por criterios del área mínima cartografiada de 1 mm² a escala 1:250 000.

Metodología

El mapa dasimétrico propuesto se fundamenta en la intersección de la información citada, considerando que la cobertura de suelo debe ser clasificada por el campo “Entidad”; lo que significa un primer nivel de agregación que establece los grandes tipos de cobertura (Figura 2).

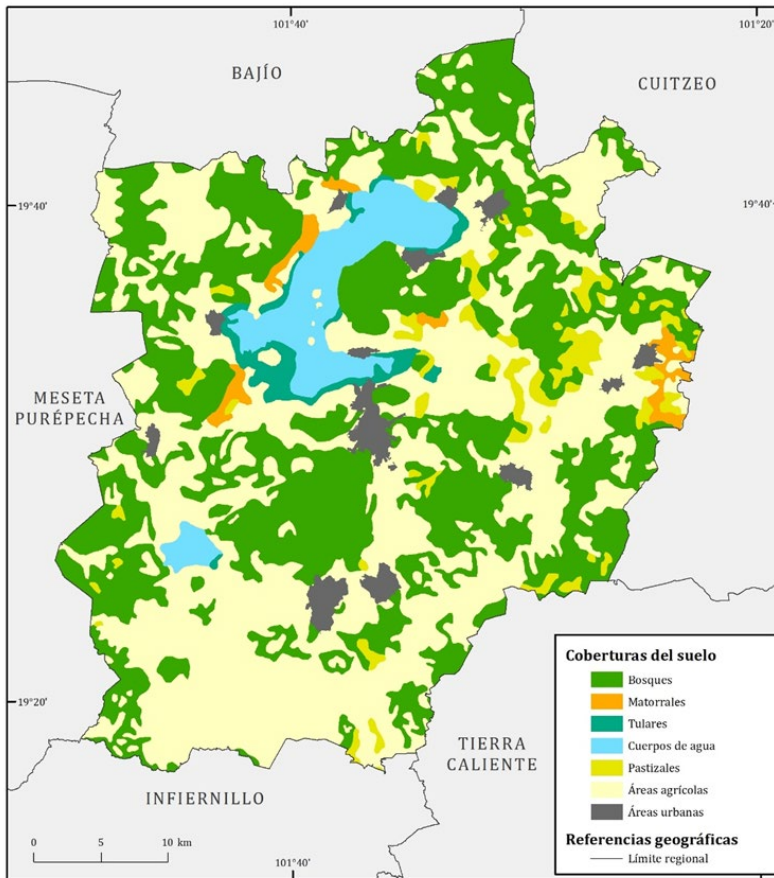


Figura 2. Vegetación y uso del suelo en la región Pátzcuaro Zirahuén.

Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

Esta información se interseca con los límites municipales, con la finalidad de considerar diferentes políticas de ocupación de suelo, ya que cada municipio en México puede administrar su territorio y organizar a la población que vive en él.

Finalmente, los polígonos resultantes adquieren la información de la cantidad de habitantes proveniente del Censo General de Población y Vivienda; así, se establece una sumatoria de habitantes en las localidades que están emplazadas sobre un mismo polígono, pudiendo obtener la densidad de población con las áreas de los polígonos subyacentes.

Con base en la aplicación de las consideraciones metodológicas, se generó un archivo vectorial con 420 polígonos dentro de la zona de estudio, donde el más alto valor de densidad de población registrado fue de 12 312 hab/km² y los más bajos fueron los que el método reveló como espacios deshabitados. Ante este gran número de datos y realidades, cobra relevancia la interpretación y uso de la información cuantitativa generada.

Estrategia metodológica para la obtención de las experiencias cognitivas

Este trabajo pretende la captura de las experiencias cognitivas, a la vez que proyecta conseguir un acercamiento entre las teorías inscritas y la realidad, objeto de estudio por medio del razonamiento inductivo. Las investigaciones cualitativas se han usado para indagar las actitudes y reacciones de un grupo específico frente a un tema de interés y/o producto; en este caso, el tema de interés cartográfico es la interacción de un perfil de usuario con el método dasimétrico y el producto bajo inspección es el propio mapa dasimétrico.

Comparte fundamentos metodológicos con los estudios de caso, toda vez que registran situaciones conductuales de las personas involucradas, donde el conocimiento más profundo de sus razonamientos contribuye al desarrollo de la teoría (ya sea corroborándola o enriqueciéndola) y se puede obtener la transferibilidad a otros casos (Martínez, 2006).

Bajo estas bases, se conformaron distintos grupos de personas dispuestas a registrar su experiencia cognitiva con el método dasimétrico. En estos grupos se contó con un moderador, quien introdujo el tema a través de nociones básicas que dieran marco a la existencia del método en Cartografía; asimismo, solventó cuestionamientos particulares, encuadró momentos específicos para responder preguntas y mostró la información complementaria necesaria para realizar el ejercicio.

Dentro de la dinámica fue implementada la realización de una entrevista en su forma semiestructurada; las respuestas fueron escritas con el objetivo de contar con un registro físico de las experiencias cognitivas. La entrevista contuvo reactivos cerrados, de selección de opciones a nivel cualitativo y abiertos para efectuar operaciones algebraicas o expresar opiniones del método; así también, pudo ser contestada paulatinamente siguiendo el guion del moderador, aunque con posibilidades para aclarar términos, respetar raciocinios individuales y reducir formalismos, tal como es recomendado por Díaz-Bravo *et al.* (2013); todo ello, con el fin de obtener la máxima fiabilidad en las respuestas, según las características de esta técnica.

Los participantes registraron sus experiencias cognitivas en esta entrevista, las cuales se clasificaron en las cinco categorías siguientes y cuyos cuestionamientos específicos se detallarán en el desarrollo de cada una:

- Eficacia en la identificación de signos cartográficos en diferentes clasificaciones
- Selección del mapa dasimétrico de densidad de población y sus características
- Obtención de información con la variable relacionada
- Perspectiva de uso del método dasimétrico
- Reflexiones en torno al método dasimétrico.

Perfil de los participantes

Se contó con la participación de 33 personas en total, de las cuales 48.5% correspondieron al género femenino y 51.5% al género masculino. Una característica importante fue la de ser estudiantes de último año de Licenciatura en Geografía, ello otorga a los entrevistados una relativa experiencia en la lectura de los mapas.

Asimismo, debían declarar tener interés en la Cartografía con el fin de asegurar un ejercicio cognitivo más confiable; esto se consiguió mediante la selección de estudiantes inscritos en asignaturas optativas de temática cartográfica del currículo de la licenciatura citada; finalmente, también fue requerido un conocimiento mínimo o nulo acerca del método dasimétrico para asegurar una opinión más pura en la experiencia cognitiva con el método.

La edad promedio de los participantes de la prueba fue de 23.5 años, siendo 20 años la mínima registrada y 35 la máxima. Se trata entonces de un perfil de adulto joven, en últimas fases de formación para convertirse en profesionalista de la Geografía.

La característica más sobresaliente de diferenciación interna de los participantes —sobre la cual se contrastarán singularidades en las experiencias cognitivas— se refiere al avance académico en sus estudios; en este sentido, 54.5% declaró haber concluido más de 90% de los créditos de la Licenciatura, 24.2% entre 80 y 90%, 15.2% entre 70 y 80%, y el restante 6.1% tiene menos del 70%, pero el avance suficiente para cursar materias optativas.

A los participantes les fue cuestionado su interés en la Cartografía, a fin de asegurar la responsabilidad en las respuestas emitidas. En este punto, 42.4% manifestó tener un muy alto interés, 51.5% un alto interés y 6.1% un interés medio. Ninguno de los participantes registró bajo o muy bajo interés en la disciplina, por lo cual todas las entrevistas se consideraron apropiadas para este ejercicio.

Resultados en la interpretación del modelo dasimétrico

Eficacia en la identificación de signos cartográficos en diferentes clasificaciones

Un primer punto propuesto como reflexión en la experiencia cognitiva, consistió en cerciorarse sobre la correcta identificación² de los signos cartográficos por parte de los lectores. Como es sabido, la selección de la clasificación es perteneciente a la fase de redacción del mapa; no obstante, la correcta identificación de las clases por los usuarios puede ayudar al cartógrafo a decantarse por una clasificación u otra.

Dada la generación de 420 polígonos en el mapa dasimétrico de la densidad de población en la región analizada, pueden tomarse diversas posturas. En principio, bajo el supuesto de que es posible reconocer condiciones “muy altas”, “altas”, “medias”, “bajas” y “muy bajas”, el primer mapa dasimétrico que se puede proponer responde a esta concepción, salvo que a esas cinco clases se añade la categoría de los espacios deshabitados que evidenció el método (Figura 3).

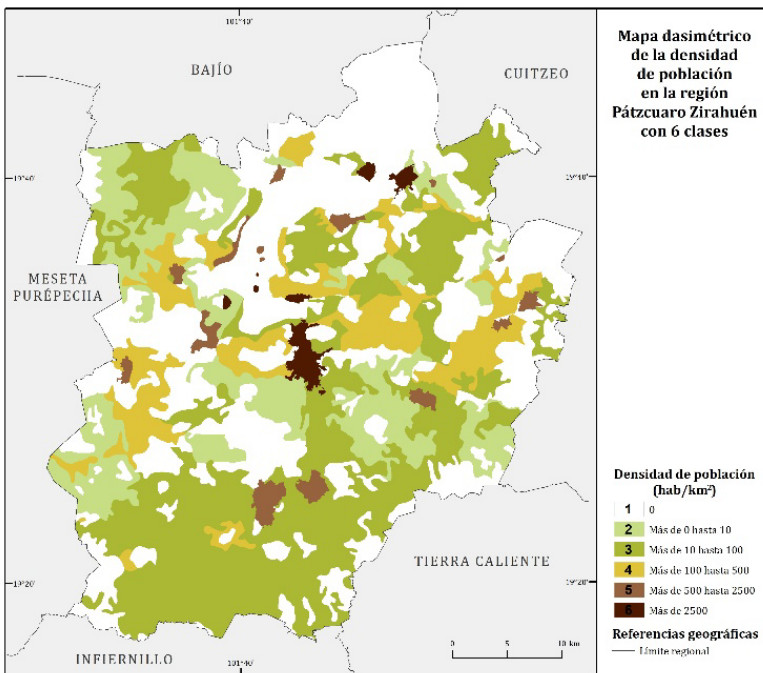


Figura 3. Muestra del modelado dasimétrico en 6 clases presentado a los entrevistados.

Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010a; INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

² Se asume el concepto de identificación de Suavita y Flórez (1992), cuando lo reflexionan como un proceso de lectura que se considera como el más importante en el uso de mapas.

Una segunda propuesta corresponde a una gradación más detallada derivada de la anterior, en la que se pueden reconocer condiciones “muy altas”, “altas”, “moderadamente altas”, “medias”, “moderadamente bajas”, “bajas” y “muy bajas”; a estas categorías se le añaden los espacios deshabitados, lo que resulta en un mapa de 8 clases (Figura 4).

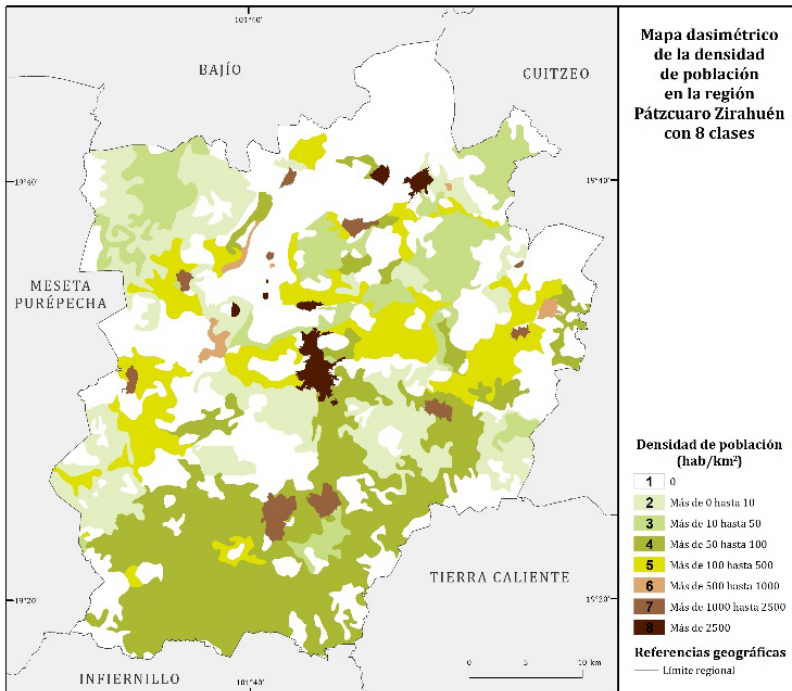


Figura 4. Muestra del modelado dasimétrico en 8 clases presentado a los entrevistados. Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010a; INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

Una tercera alternativa puede emplear la formulación establecida por Sturges (1926; en Dent *et al.*, 2009), basada en la fórmula: $1 + 3.3 \log N$; donde N es el número de datos. En este caso, con los 420 polígonos, el número de clases es semejante a 10, y una de ellas debe destinarse a los espacios deshabitados (Figura 5).

Finalmente, una cuarta alternativa es emplear la formulación: $5 \log N$ (Toyne, 1977 y Davis, 1979; en Gómez Escobar, 2004). Es reconocido que esta perspectiva brinda un mayor número de clases y, por tanto, resultaron 13 en este trabajo (Figura 6).

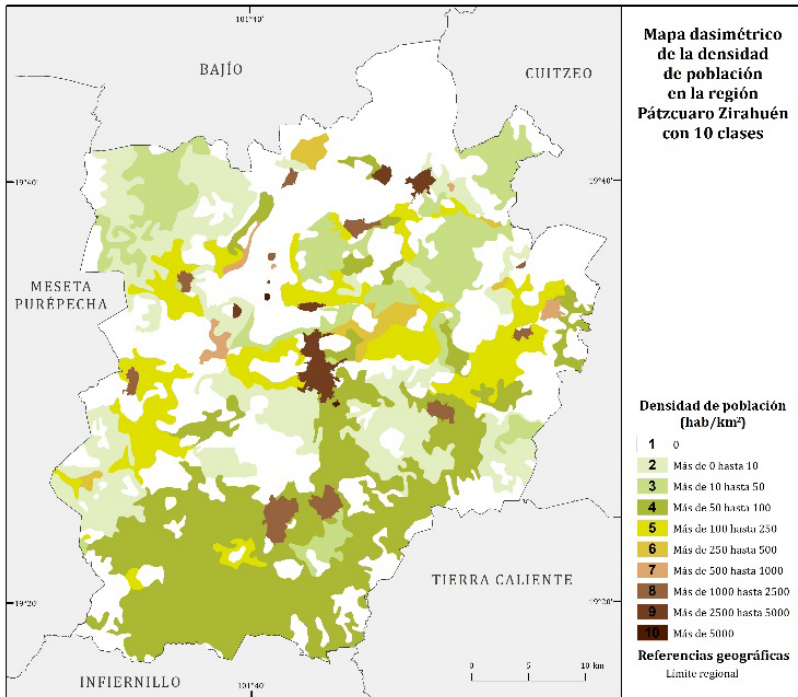


Figura 5. Muestra del modelado dasimétrico en 10 clases presentado a los entrevistados. Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010a; INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

Cabe destacar que, para la escisión de las clases, se adoptó un criterio geométrico, debido al comportamiento estadístico de los datos; no obstante, se asumió un razonamiento cognoscitivo para ajustarlo, redondeando las cifras —como es recomendado por Brewer (2016)— y manteniendo estables algunas de ellas; con ello se pudo concentrar la interpretación de los participantes.

Las cuatro clasificaciones fueron presentadas a los entrevistados y se les solicitó lo siguiente: “En cada mapa, señala dos sitios que identifiques que pertenecen a cada rango, según el número correspondiente de la leyenda”. Los resultados de identificación se contrastaron con las bases de datos originales procesadas en SIG que contienen los valores específicos de densidad de población; con ello, se pudo establecer un número de aciertos y errores de los intérpretes que se tradujo en un porcentaje de eficacia en la identificación.

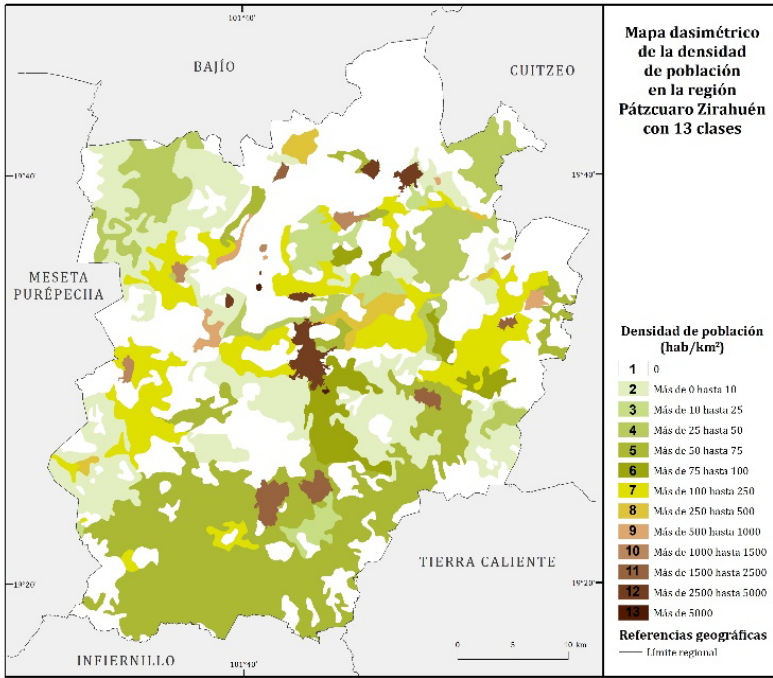


Figura 6. Muestra del modelado dasimétrico en 13 clases presentado a los entrevistados. Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010a; INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

La Figura 7 muestra que, aunque ninguna clasificación alcanzó el 100% de eficacia en la identificación, un menor número de clases otorga mayor porcentaje de aciertos, lo que es lógico; ahora bien, un dato relevante es que sólo dos personas pudieron acertar por completo la identificación en el modelo de 13 clases y sólo una completó los cuatro ejercicios sin fallo.

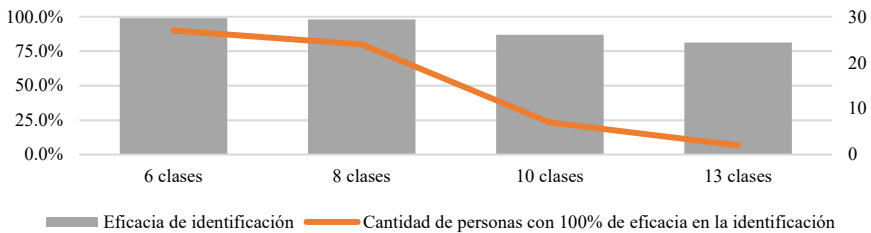


Figura 7. Eficacia en la identificación en las diferentes clasificaciones aplicadas al método dasimétrico de densidad de población. Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

Asimismo, existe una relación directa entre el avance académico de los participantes y su eficacia de interpretación. Aquéllos con más de 90% de créditos, alcanzaron 94.8% de aciertos; los que poseen entre el 80 y 90% de créditos, tuvieron 87.0%; los situados entre 70 y 80% de avance académico, obtuvieron una eficacia de 86.5%; y los que tienen menos de 70% de avance, sólo registraron correctamente el 82% de las identificaciones solicitadas.

Complementariamente, a fin de redondear la captura de esta experiencia cognitiva, se solicitó que brindaran la opinión de la facilidad o dificultad del ejercicio anterior. Se presentaron las cinco categorías siguientes: “Muy fácil”, “Fácil”, “Moderado”, “Difícil” y “Muy difícil” para cada clasificación presentada. La figura 8 muestra las opiniones de los participantes, donde se asignó un valor de 1 para lo considerado “Muy fácil”, 2 para lo “Fácil”, 3 para lo “Moderado”, 4 para lo “Difícil” y 5 para lo “Muy difícil”. Se aprecia que, para ellos, el modelo de 6 clases es muy fácil de interpretar y el modelo de 8 clases también se ubica en el ámbito de la facilidad; el modelo de las 10 clases presenta un considerable aumento en el esfuerzo de lectura, al ubicarse entre lo moderado y lo difícil, y el modelo de las 13 clases ronda la perspectiva de haber sido un trabajo muy difícil.

Así, en este ejercicio, existe una correlación positiva entre la eficacia de identificación y la percepción de facilidad/dificultad en la lectura de la información.

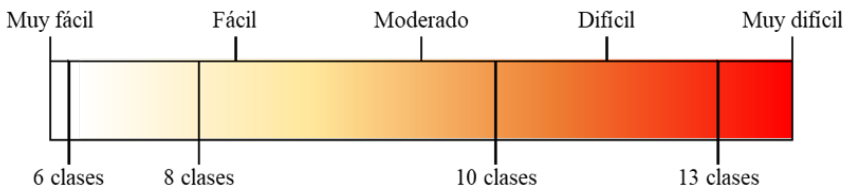


Figura 8. Perspectiva promedio de la opinión de los participantes respecto a la facilidad o dificultad de la interpretación de diferentes clasificaciones.

Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

Selección del mapa dasimétrico de densidad de población y sus características

Una vez ejecutada la identificación de las clases, resulta relevante conocer cuál de las clasificaciones sería utilizada por ellos para presentar el mapa dasimétrico de densidad de población. Sin embargo, para tomar una decisión más informada, se les presentaron tablas auxiliares con la aproximación estadística de la clasificación a la realidad, tomando en cuenta que la cantidad de población a nivel censal es de 200 145 habitantes (Tablas 1-4).

Tabla 1
Tabla auxiliar del modelo dasimétrico con 6 clases

<i>Densidad de población (hab./km²)</i>	<i>Densidad media del rango</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Población estimada por rango de densidad</i>
0	0.00	656.891	0
Más de 0 hasta 10	2.37	264.372	625
Más de 10 hasta 100	46.44	552.448	25,654
Más de 100 hasta 500	190.31	188.843	35,939
Más de 500 hasta 2500	1,274.67	36.847	46,968
Más de 2500	5,302.49	20.495	108,674
Total estimado por la clasificación			217,861

Fuente: elaborado con base en procesamiento en Sistema de Información Geográfica.

Tabla 2
Tabla auxiliar del modelo dasimétrico con 8 clases

<i>Densidad de población (hab./km²)</i>	<i>Densidad media del rango</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Población estimada por rango de densidad</i>
0	0.00	656.891	0
Más de 0 hasta 10	2.37	264.372	625
Más de 10 hasta 50	27.07	165.373	4,476
Más de 50 hasta 100	69.96	387.075	27,078
Más de 100 hasta 500	190.31	188.843	35,939
Más de 500 hasta 1000	770.15	10.005	7,706
Más de 1000 hasta 2500	1,526.93	26.842	40,986
Más de 2500	5,302.49	20.495	108,674
Total estimado por la clasificación			225,485

Fuente: elaborado con base en procesamiento en Sistema de Información Geográfica.

Tabla 3
Tabla auxiliar del modelo dasimétrico con 10 clases

<i>Densidad de población (hab./km²)</i>	<i>Densidad media del rango</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Población estimada por rango de densidad</i>
0	0.00	656.891	0
Más de 0 hasta 10	2.37	264.372	625
Más de 10 hasta 50	26.97	165.373	4,460
Más de 50 hasta 100	60.26	387.075	23,327
Más de 100 hasta 250	166.97	167.034	27,889
Más de 250 hasta 500	282.64	21.809	6,164
Más de 500 hasta 1000	770.15	10.005	7,706
Más de 1000 hasta 2500	1,526.93	26.842	40,986
Más de 2500 hasta 5000	3,506.43	19.977	70,048
Más de 5000	10,690.66	0.518	5,537
Total estimado por la clasificación			186,741

Fuente: elaborado con base en procesamiento en Sistema de Información Geográfica.

Tabla 4
Tabla auxiliar del modelo dasimétrico con 13 clases

<i>Densidad de población (hab./km²)</i>	<i>Densidad media del rango</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Población estimada por rango de densidad</i>
0	0.00	656.891	0
Más de 0 hasta 10	2.37	264.372	625
Más de 10 hasta 25	16.61	42.117	699
Más de 25 hasta 50	34.39	123.256	4,239
Más de 50 hasta 75	58.96	335.514	19,783
Más de 75 hasta 100	89.74	51.561	4,627
Más de 100 hasta 250	166.97	167.034	27,889
Más de 250 hasta 500	282.64	21.809	6,164
Más de 500 hasta 1000	770.15	10.005	7,706
Más de 1000 hasta 1500	1,187.66	7.499	8,906
Más de 1500 hasta 2500	1,866.20	19.343	36,098
Más de 2500 hasta 5000	3,506.43	19.977	70,048
Más de 5000	10,690.66	0.518	5,537
Total estimado por la clasificación			192,322

Fuente: elaborado con base en procesamiento en Sistema de Información Geográfica.

De acuerdo con la pregunta “Teniendo en cuenta la facilidad/dificultad de la interpretación y la exactitud de la aproximación al resultado, ¿qué mapa consideras que es mejor para mostrar el fenómeno de la densidad de población con el método dasimétrico?”, el orden de preferencias resultó el siguiente: 30.3% prefirió usar una clasificación en 6 rangos, 36.4% en 8 rangos, 24.2% en 10 rangos y 9.1 en 13 rangos. Cabe destacar que este reactivo no mostró correlación con el avance académico de los entrevistados.

Sin embargo, surge un dato interesante en este sentido. Si se compara el mapa preferido por cada participante con su eficacia de identificación respectiva en ese mapa, los que eligieron el mapa de las 6 clases alcanzaron un resultado de 98.1%; los que optaron por el mapa con 8 clases registraron 97% de aciertos; un descenso se presenta en la eficacia de quienes prefirieron el de 10 clases, que en promedio alcanzaron 92%; pero una caída acentuada se registró en el mapa de las 13 clases, que sólo obtuvo 68% de aciertos de quienes lo eligieron. Bajo estos datos, la eficacia disminuye si el número de clases aumenta, pero esto ocurre aun cuando ellos hayan considerado que podía ser mejor alternativa un mapa más detallado.

Para complementar esta respuesta, se les cuestionó acerca de la claridad en el mensaje central referente a las disparidades en la distribución de la población. Al respecto, 12.1% manifestó que el mensaje es claro independientemente de la clasificación utilizada, pero la gran mayoría —75.8%— eligió alguna clasificación como la de mayor aporte al mensaje central. En este sentido, 39.3% de ellos afirmó que el mensaje central quedaba clarificado usando la clasificación en 6 rangos, 35.7% en 8

rangos y 14.3% en 10 rangos y 10.7% en 13 rangos. Ahora bien, 6.1% consideró que el método dasimétrico no es adecuado para mandar un mensaje claro respecto a las diferencias en la distribución de la población.

Es así que puede juzgarse que el mapa con seis clases resultó el más asertivo para el grupo de intérpretes, no sólo porque para ellos resulta muy claro en el mensaje central, sino también porque prácticamente no presentó fallos en la identificación de signos y presenta la lectura más fácil. No obstante, para diseñar el mapa dasimétrico que mostrara la distribución de la población, fue importante conocer si presentarían la tabla auxiliar para una extracción mayor de la información, pero donde también se reflejaría la aproximación del método. Bajo el cuestionamiento “¿Colocarías en el mapa las tablas auxiliares para una mayor extracción de información?”, 72.7% se manifestó a favor y 27.3% en contra. Con ello, se redondea la experiencia cognitiva referente al diseño y presentación del mapa dasimétrico más adecuado para este perfil de usuario (Figura 9).

Obtención de información con la variable relacionada

Debido a que el método dasimétrico hace uso de una información auxiliar relacionada—en este caso la de vegetación y uso del suelo— es importante conocer si los intérpretes podían obtener información adicional, producto de la integración de las coberturas; de esta manera, les fue presentado el mapa de vegetación y uso del suelo de la región (Figura 2).

Con esta base, se les solicitó lo siguiente: “En el mapa que hayas considerado como el mejor, coloca una letra A a tres áreas agrícolas, una letra B a tres áreas de bosques y una letra C a los cuerpos de agua”. Estos ejercicios se contrastaron con los usos de suelo registrados en las bases de datos procesadas en SIG, resultando una eficacia de identificación de 89.3% para las áreas agrícolas, 90.7% para los bosques de y 95.5% para los cuerpos de agua.

Avanzando en la profundidad de la lectura del mapa, se les cuestionó “¿Qué densidad media le asignarías a las áreas agrícolas, a los bosques y a las zonas urbanas?”. Un primer paso en este reactivo es poder caracterizar, en un nivel ordenado, los espacios de mayor densidad, los situados en el medio y los de menor densidad. En este contexto, 72.7% de los participantes pudo distinguir el orden adecuado en la zona de estudio, donde los espacios urbanos son los más densamente poblados, seguidos por los agrícolas y después los bosques.

Es relevante destacar que, en esta fase de la entrevista, sí existe una relación directa entre el avance académico de los entrevistados y la distinción del orden adecuado de las densidades en los espacios urbanos, agrícolas y forestales, siendo que se obtiene mayor cantidad de aciertos cuanto mayor es el avance académico (Figura 10).

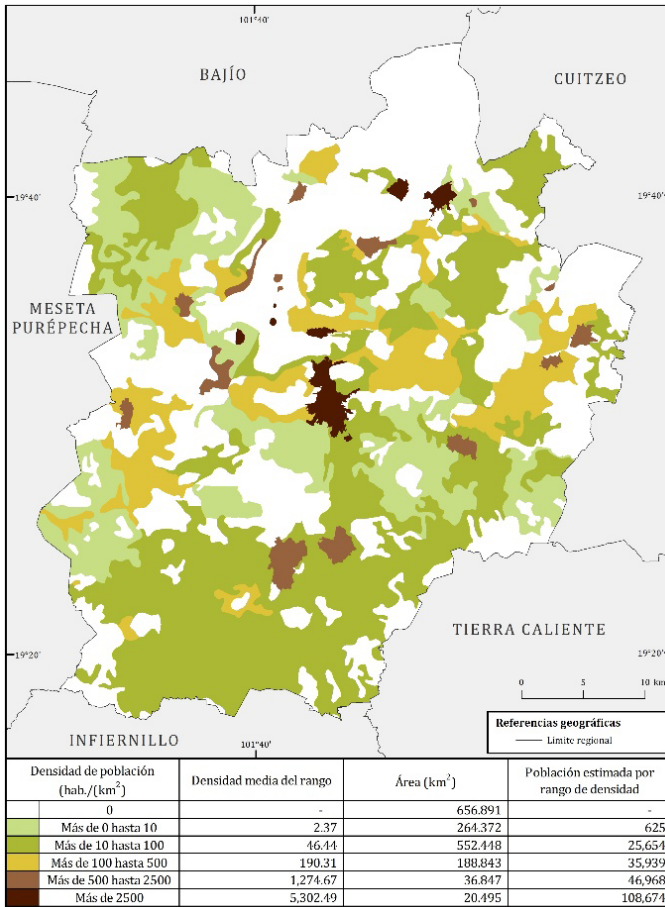


Figura 9. Mapa dasimétrico con 6 clases de densidad de población en la región Pátzcuaro Zirahuén.

Fuente: elaborado sobre la base de INEGI, 2010a; INEGI, 2010b; INEGI, 2013a; INEGI, 2013b; CGAP, 2016.

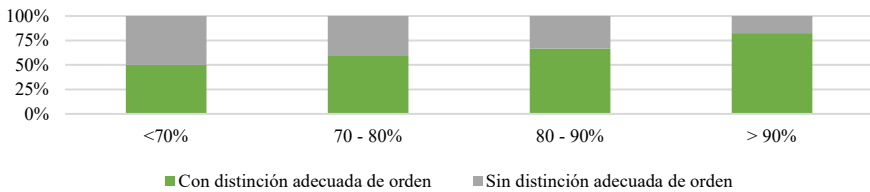


Figura 10. Logros de distinción adecuada del orden de densidades de población según avance académico de los entrevistados.

Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

Desde el punto de vista cuantitativo del fenómeno, todos los participantes otorgaron cifras de densidad para los tres diferentes espacios solicitados. Mediante un promedio de los datos, atribuyeron 1 937 hab/km² a las zonas urbanas, 98 hab/km² a las áreas agrícolas y 49 hab/km² a los bosques. Es importante señalar que estas cifras promedio provienen de consideraciones ampliamente variables; por esta razón, es relevante analizar cuántos de ellos se aproximaron a una cifra de $\pm 25\%$ de error, siendo las cifras reales promedio de la zona 2 445 hab/km² para las zonas urbanas, 88 hab/km² para las áreas agrícolas y 7 hab/km² para los bosques. Bajo este criterio, sólo dos personas —que corresponden al 6.1% de los entrevistados— lograron acercarse a las tres cifras promedio dentro del margen de error, 24.2% tuvieron dos aproximaciones adecuadas, 33.3% una aproximación adecuada y 36.4% salieron del margen de error en todos los casos.

En este contexto, vinculando el entendimiento cualitativo-ordenado del fenómeno y la exactitud cuantitativa dada por el número de aproximaciones adecuadas, se puede figurar, en un esquema bi-conformado, el acercamiento a la comprensión del fenómeno de la densidad de población con el mapa dasimétrico, donde la cercanía hacia el segmento superior derecho refleja la mejor apropiación (Figura 11).

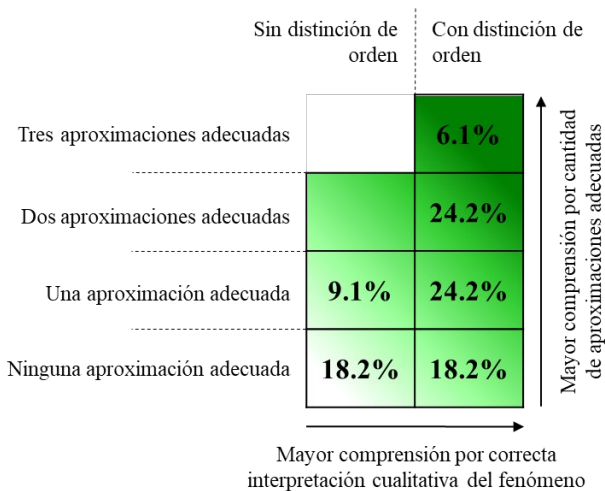


Figura 11. Comprensión del fenómeno de la densidad de población en la región Pátzcuaro Zirahuén mediante la conjunción de las interpretaciones cualitativas y cuantitativas.

Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

En un último alcance de la relación de información —el más demandante, dado que se asocia con el proceso de la inducción cartográfica o la extensión del contenido

del mapa— se solicitó proporcionar una cifra de porcentaje de habitantes en las tres coberturas de uso del suelo y vegetación; específicamente se cuestionó: “Si las áreas agrícolas ocupan 773.1 km², los bosques 676.4 km² y las zonas urbanas 48.2 km², ¿podrías acercarte a calcular la proporción de población que vive en esos usos de suelo?”. Cabe destacar que, en este reactivo, 45.5% de los entrevistados rehusaron responder, bajo el argumento de no tener la cifra total absoluta, partir de datos clasificados o desconocer el procedimiento para obtener el resultado; lo cierto es que la cifra censal de 200 145 habitantes en la región sí fue proporcionada, e incluso se mostraron las cifras calculadas de acuerdo con el modelo de clasificación; también resulta cierto que los entrevistados debían de partir de comportamientos medios de densidad para poder dar un resultado. No obstante, más allá de requerir cifras precisas, lo relevante es conocer los diferentes alcances de los intérpretes y la medida en que se puede llegar a una imagen más completa del fenómeno cartografiado.

Así, 48.5%³ de los entrevistados que tomó la alternativa de proporcionar cifras, consiguieron, en general, una impresión adecuada del fenómeno; de ellos, 81.3% identificó adecuadamente que la mayor proporción de población vive en ámbitos urbanos, seguidos por las áreas agrícolas y los bosques (Figura 12).

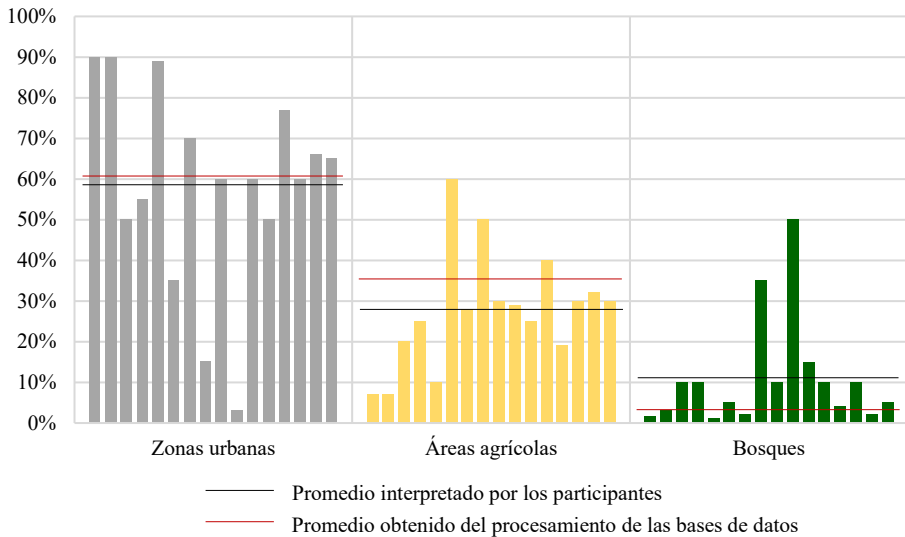


Figura 12. Perspectiva interpretativa de los participantes referente al porcentaje de población que habita en distintos usos de suelo.

Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

³ Dos entrevistas fueron eliminadas en este reactivo por resultar incomprensibles para su registro.

Perspectiva de uso del método dasimétrico

Trascendiendo la región de estudio, a la pregunta: “¿Consideras que el método dasimétrico es adecuado para modelar la densidad de población?”, 78.8% de los participantes contestó afirmativamente. Más allá de la interpretación del fenómeno, ahondando en la posibilidad de uso del método por parte de los entrevistados, al cuestionar: “En tus trabajos, ¿usarías el método dasimétrico para expresar la densidad de población?”, 87.9% se manifestó a favor. Por su parte, cuando se preguntó: “¿El método te inspira a pensar en otras relaciones espaciales para mostrar un comportamiento distinto del fenómeno a nivel cuantitativo?”, 97.0% de los entrevistados respondió en sentido positivo. De estas respuestas se extrae que es el método dasimétrico el que captura la atención; el fenómeno —la densidad de población— acopia, relativamente, menos interés de los participantes.

Reflexiones en torno al método dasimétrico

La relevancia de haber interactuado con personas con escaso o nulo contacto con el método dasimétrico tiene relevancia en este punto, ya que puede dar una opinión más pura de la apreciación del método. En esta fase de la entrevista, se optó por un reactivo de respuesta abierta que les permitiera expresar más libremente sus opiniones. En estos textos pueden apreciarse cinco tipos de reflexiones diferenciados en torno al método, pero no excluyentes entre sí: aprehensión general, cualidades percibidas, restricciones percibidas, interés académico-cartográfico y temáticas de aplicación. A través de la técnica gráfica de la nube de conceptos, es posible brindar una idea de la experiencia obtenida a través de la interacción con método dasimétrico (Figura 10).

En las expresiones de aprehensión general, los intérpretes se abocan a caracterizar lo recientemente conocido desde la posición más amplia; se trata de posiciones neutrales o ligeramente positivas, pero de las que deriva una explicación de la apreciación. En cuanto la percepción de las cualidades, los intérpretes evalúan los aportes que les brinda el método y, de forma natural, surgen expresiones positivas. Por su parte, en lo referente a las restricciones percibidas, los intérpretes suelen conjeturar las situaciones en las que el método no se aplicaría y las dificultades que enfrentaron durante la interacción. El interés académico-cartográfico queda evidenciado cuando los intérpretes deducen el sentido abstracto que puede tener la aplicación del método. Finalmente, en las temáticas de aplicación, visualizan la concreción en función de las posibilidades temáticas vislumbradas.

Discusión

Dado el perfil de los participantes, se tienen bases para sustentar que el modelo de las 10 clases presenta un buen porcentaje de eficacia en la identificación de los signos cartográficos y, al mismo tiempo, presenta una adecuada aproximación a la realidad



Figura 10. Tipos de reflexiones derivadas de la lectura del mapa con empleo del mapa dasimétrico.
Fuente: elaborado sobre la base de trabajo directo.

geográfica, contabilizando al 93.3% de la población censada; además, resultó suficientemente retador en su lectura. No obstante, comúnmente el intérprete desea asegurarse de haber realizado una identificación sin fallo; ésta es, posiblemente, la razón por la cual la mayoría de ellos eligieron los mapas con 6 y 8 clases.

No se considera que en esta selección haya influido el uso de las variables visuales de los mapas presentados, ya que se optó por tres diferentes matices de colores, jerárquicamente secuenciados en el espectro electromagnético (verde-amarillo-naranja) y potenciados por la variable visual de valor, que es correspondiente con la naturaleza cuantitativa de la información del mapa y podría otorgar hasta seis diferencias distintas por cada matiz de color, como lo advierten Monmonier (1996), Gómez Escobar (2004) y Tyner (2010). Por su parte, Brewer (2016) advierte el decremento en la capacidad de discernir colores al incrementarse el número de clases, por ello también considera que, cuando las clases se incrementan, deben existir transiciones en el matiz, y no sólo en la luminosidad, tal como se hizo en este ejercicio.

La generación de una gran cantidad de polígonos que podrían permitir un menor grado de generalización en las clases y la diferencia estadística más pequeña en la aproximación del modelo a la realidad, no es necesariamente el mejor camino al momento en que interviene la interpretación humana. Este trabajo demostró que la eficacia en la identificación del 81% de los signos en el mapa de 13 clases diluye el mensaje central en la mente de los intérpretes e, incluso, podría tener impactos ante un eventual recuento de población siguiendo sus interpretaciones.

Para el grupo entrevistado, el método se reveló como una alternativa satisfactoria para cartografiar con mayor detalle y naturalidad el comportamiento de información en espacios de poca o nula subdivisión político-administrativa; en este sentido, se razonó especialmente útil para estudios a escala municipal y microrregional. Sin embargo, no debe considerarse que el método es exclusivo de escalas medias y grandes; podría aplicarse en espacios geográficos de mayor amplitud que impliquen una escala más pequeña; el requerimiento es hacer uso de información auxiliar para modelar los procesos, y que esta información se presente con una generalización apropiada a la escala cartográfica elegida.

Los participantes pudieron distinguir, de forma empírica, con base en sus conceptos sobre Cartografía, algunas de las cualidades del método dasimétrico. Al caracterizarlo como “detallado”, “preciso”, incluso como “complejo”, o que tiene como finalidad la “relación de variables”, puede considerarse que manifestaron sintonía con las definiciones de Robinson *et al.*, (1987: 346) cuando refieren que “Mediante la subdivisión de unidades de áreas estadísticas originales, puede añadirse detalle adicional a la presentación en base a cualquier conocimiento que el cartógrafo tenga acerca de los datos [...]”; o cuando DeMers (2005: 283) reflexiona que “El cartografiado dasimétrico intenta romper las estructuras artificiales para desenmascarar las estructuras escondidas”. Con ello, se deduce que el método, por sí mismo, emite mensajes contundentes de sus características principales; dentro de ellas, la dificultad que implica su concepción académica.

Conclusiones

Si bien, en este trabajo, los participantes entrevistados fueron sustancialmente concebidos como usuarios —lectores— de un mapa dasimétrico, puede reconocerse que también subyacía la perspectiva de ser modeladores y propagadores del método; por esta causa, el trabajo hace uso de materiales y técnicas a su alcance. Particularmente, los materiales están puestos a disposición gratuita y “en línea” por el principal organismo responsable de la información cartográfica en México, que es el INEGI; asimismo, los procedimientos en SIG para la obtención del mapa dasimétrico no son ajenos a lo que pueden ejecutar.

Este estudio revela que los entrevistados, como usuarios del método, pudieron obtener una lectura apropiada del mapa dasimétrico; sin embargo, su gusto y logros en la lectura son ligeramente tendientes hacia los niveles menos detallados. Ahora bien, es posible pensar que las generaciones recientes de geógrafos interesados en la Cartografía desean mensajes más rápidos y contundentes en los mapas.

En este sentido, es posible afirmar que la Cartografía debe fomentar la continua evaluación de sus propuestas y modelos; si se toma en cuenta el hecho de que el ser

humano cambia en el tiempo las formas de comunicarse y de comprender los mensajes; entonces, la Cartografía, como medio de comunicación, también debe entender continuamente los requerimientos y habilidades del intérprete.

El hecho de tomar en cuenta las experiencias cognitivas tiene sentido en las etapas de evaluación y retroalimentación cartográfica; el cartógrafo puede desapegarse de la imposición en la modelación de los fenómenos y tomar en cuenta las necesidades y conocimientos del intérprete; sin embargo, también cabe la posibilidad de hacer un balance. Aun cuando es cierto que los estudios de cognición aplicados a los mapas se formulan para conocer al usuario, y éste manifestará una inclinación o gusto por una representación, también hay que evaluar sus habilidades de interpretación. En tanto ambos resultados sean positivos, se puede escoger entre la visión del usuario o la del cartógrafo; empero, si hay experiencias de identificación poco exitosas por parte del usuario, debe privilegiarse el mejor resultado en la lectura.

Si bien es necesario seguir postulando estrategias para la captura de experiencias cognitivas, las recopiladas en este trabajo reafirman que la Cartografía no es sólo técnica aplicada; las posibilidades de interpretación y de presentación de la información, restringen las soluciones técnicas que puedan ofrecerse.

Agradecimientos

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME. Proyecto PE304418 “Contribución de las perspectivas temática y matemática en las experiencias cartográficas actuales”.

Se agradece, asimismo, la participación comprometida de los estudiantes de la licenciatura en Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Bibliografía

- Brewer, C. (2016). *Designing Better Maps. A guide for GIS Users*, ESRI Press, United States of America, 231 pp.
- CGAP (2016). *Región VII Pátzcuaro Zirahuén*, Coordinación General de Gabinete y Planeación, Gobierno del Estado de Michoacán <<http://publicadorlaip.michoacan.gob.mx/itdif/2017/71/Caracterizacion%20Regional%20Patzcuaro%20Zirahuen.pdf>>, consultado en mayo 2018.
- DeMers, M.N. (2005). *Fundamentals of Geographic Information Systems*, Wiley, New York, 468 pp.
- Dent, B.D.; J.S. Torguson and T.W. Holder (2009). *Cartography: thematic map design*, McGraw-Hill, USA, 336 pp.
- Díaz-Bravo, L.; U. Torruco-García; M. Martínez-Hernández; M. Varela-Ruiz (2013). “La entrevista, recurso flexible y dinámico”, *Investigación en Educación Médica*, núm. 7, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 162-167.

- DiBiase, D. (1990). "Visualization in the Earth Sciences", *Earth and Mineral Sciences Bulletin*, 59(2), The Pennsylvania State University, Pennsylvania, pp. 13-18.
- Eckert, M. (1961). *Cartografía*, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, 162 pp.
- Eicher, C. and Brewer, C. (2001). "Dasymetric Mapping and Areal Interpolation: Implementation and Evaluation", *Cartography and Geographic Information Science*, 28(2), Taylor & Francis, UK, pp. 125-138.
- Gómez Escobar, M.C. (2004). *Métodos y técnicas de la Cartografía Temática*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 175 pp.
- INEGI (2010a). *Censo de Población y Vivienda 2010: Principales resultados por localidad (ITER)*, México, <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/iter_2010.aspx>, consultado en mayo 2018.
- (2010b). *Marco geoestadístico 2010 versión 5.0*, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México, <<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292812>>; consultado en mayo 2018.
- (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie V (Continuo Nacional) Morelia*, México <<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568580>>; consultado en mayo 2018.
- (2013b). *Marco geoestadístico 2013 versión 6.0*, México <<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292829>>; consultado en mayo 2018.
- (2017). *Marco Geoestadístico, junio 2017*, México <<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463142683>>; consultado en mayo 2018.
- Jameson, F. (1991). *La lógica cultural del capitalismo tardío*, Paidós, Barcelona, 121 pp.
- Joly, F. (1979). *La Cartografía*, Ariel, Barcelona, 280 pp.
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*, The MIT Press, U.S.A., 194 pp.
- MacEachren, A. (1994). "Visualization in Modern Cartography: Setting the agenda" in MacEachren, A.; D.R. Fraser Taylor (eds.) *Visualization in Modern Cartography*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 1-12.
- Martínez, P. (2006). "El método de estudio de caso. Estrategia metodológica de la investigación científica", *Pensamiento y gestión*, núm. 20, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, pp. 165-193.
- Mennis, J.; Hultgren, T. (2006). "Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation", *Cartography and Geographic Information Science*, 33(3), Taylor & Francis, UK, pp. 179-194.

- Monmonier (1996). *How to lie with maps*, The University of Chicago Press, Chicago, 207 pp.
- Montello, D. (2002). "Cognitive Map-Design Research in the Twentieth Century: Theoretical and Empirical Approaches", *Cartography and Geographic Information Science*, 29(3), Taylor & Francis, UK, pp. 283-304.
- Neves, O.; J. Strauch and C. Ajara (2017). "Dasymetric methods applied to Jacarepaguá watershed", *Bulletin of Geodetic Sciences*, 23(4), Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil, pp. 606-622. DOI: 10.1590/s1982-21702017000400040.
- Raisz, E. (1948). *General Cartography*, McGraw Hill, New York, 254 pp.
- Robinson, A.H.; R.D. Sale; J.L. Morrison y P.C. Muehrcke (1987). *Elementos de Cartografía*, Omega, Barcelona, 543 pp.
- Sleeter, R. (2013). "Dasymetric mapping techniques for the San Francisco Bay region, California", *Urban and Regional Information Systems Association, Annual Conference Proceedings*, Des Plaines, Illinois, 12 pp.
- Suavita, M. y A. Flórez (1992). "La percepción y la comprensión en Cartografía Temática", *Revista Cartográfica*, núm. 61, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, pp. 105-130.
- Tapp, A.F. (2010). "Areal Interpolation and Dasymetric Mapping Methods Using Local Ancillary Data Sources", *Cartography and Geographic Information Science*, 37(3), Taylor & Francis, UK, pp. 215-228.
- Tyner, J. (2010). *Principles of map design*, The Guilford Press, New York, 258 pp.
- Wood, D. (1992). *The Power of Maps*, The Guilford Press, New York, 248 pp.

Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo

Fernando Pavón*
S. Daniel Andrade**
Benjamin Bernard**
Diana Contreras***

Recibido 3 de mayo de 2018; aceptado 8 de octubre de 2018

Abstract

The complex volcano of Cayambe in Ecuador represents a potential threat, especially for populations that base their economy in floriculture. In this work, we present: 1) spatially modeling the eruption scenarios of the volcano, 2) spatially modeling the potential impact of these risk scenarios by lahar and ash affectation; and 3) evaluate the socioeconomic impacts of eruption scenarios modeled by ash fall through a statistical analysis of numerical simulations of eruptive scenarios and areas affected by lahars taken from the new hazard map of Cayambe. Thus, it was determined that an ash depth of 20 to 50 mm would be the main issue, covering 81.46% of the surface with losses amounting to USD 320 million in plants and greenhouses. In the case of lahars, the losses would occur on the grounds. In the case of primary lahars, there might be an estimated loss of USD 45 million and in secondary lahars; the loss might be about USD 15 million. Results obtained in the simulations have a better level of detail than those obtained in previous years by the available cartographic information of the sector and the computational tools utilized. This ties in with Cayambe's depos-

* Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía, Quito, Ecuador, correo electrónico: fernando.pavon@epn.edu.ec

** Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, correos electrónicos: dandrade@igepon.edu.ec; bbernard@igepon.edu.ec

*** Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, correo electrónico: diana.contreras@cigiden.cl

its and can be managed for the decision-making in the interest of the affected populations, considering that an eruption of the Cayambe volcano requires careful attention for its high local and national socioeconomic impact because flower exportations are an important economic sector for the country.

Key words: *Cayambe, ash, lahar, SIG, socio-economic impact.*

Resumen

El complejo volcánico Cayambe representa una potencial amenaza para poblaciones que basan su economía en la floricultura. En este trabajo, se presenta: 1) modelar espacialmente escenarios de erupción del volcán, 2) modelar espacialmente el potencial impacto de estos escenarios de riesgos por afectación de lahares y de ceniza; y 3) evaluar los impactos socioeconómicos de escenarios de erupción modelados por caída de ceniza mediante un análisis estadístico de simulaciones numéricas de escenarios eruptivos y zonas de afectación por lahares tomadas del nuevo mapa de amenazas del Cayambe. Así se determinó que espesores de ceniza de 20 a 50 mm serían el principal problema cubriendo el 81.46% de la superficie con pérdidas que ascienden los 300 millones de dólares en plantas e invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se darían en los suelos y se estiman pérdidas de 45 millones de dólares en el caso de lahares primarios y 15 millones de dólares en caso de lahares secundarios. Los resultados obtenidos en las simulaciones tienen mejor nivel de detalle que los obtenidos en años anteriores por la información cartográfica disponible del sector y las herramientas computacionales utilizadas; los mismos que concuerdan con los depósitos del Cayambe y pueden ser manejados para la toma de decisiones en beneficio de las poblaciones afectadas, considerando que una erupción del volcán Cayambe merece una atención especial por su alto impacto socioeconómico local y nacional por ser las exportaciones de flores un rubro importante para el país.

Palabras clave: *Lahar, ceniza, SIG, Cayambe, impacto socioeconómico.*

Resumo

O complexo vulcânico Cayambe representa uma potencial ameaça para populações que baseiam sua economia na floricultura. Neste trabalho, se apresenta: 1) modelar espacialmente os cenários de erupção do vulcão; 2) modelar espacialmente o potencial impacto destes cenários de riscos afetados por lahares e cinzas e, 3) avaliar os impactos socioeconômicos de cenários de erupção modelados por queda de cinzas mediante uma análise estatística de simulações numéricas de cenários eruptivos e zonas afetadas por lahares, tomadas pelo novo mapa de ameaças do Cayambe. Assim se determinou que espessuras de cinza de 20 a 50 mm seriam o principal problema cobrindo 81.46% da superfície com perdas que ascendem os 300 milhões de dólares (USD) em plantas e estufas. No caso de lahares as perdas se dariam nos solos e se estimam perdas de 45 milhões de dólares no caso de lahares primários e 15 milhões

no caso de lahares secundarios. Os resultados obtidos nas simulações têm melhor nível de detalhe que os obtidos em anos anteriores pela informação cartográfica disponível e as ferramentas computacionais utilizadas; os mesmos que concordam com os depósitos do Cayambe e podem ser manejados para a tomada de decisões em benefício das populações afetadas, considerando que uma erupção do vulcão Cayambe merece uma atenção especial por seu alto impacto socioeconômico local e nacional por ser as exportações de flores um item importante para o país.

Palavras chave: *Lahar, cinza, SIG, Cayambe, impacto socioeconômico.*

Introducción

La profundización de las relaciones capitalistas de producción en el sector agrario en Ecuador ha significado, para provincias como la de Pichincha, el crecimiento de actividades agroproductivas de exportación (Martínez, 1994), entre ellas la producción florícola. De manera particular los cantones Cayambe y Pedro Moncayo son los de mayor desarrollo de esta actividad en la provincia de Pichincha. Sin embargo, en estos cantones, las zonas de producción florícola se ubican en los alrededores del complejo volcánico Cayambe, un edificio volcánico que ha presentado significativa actividad en los últimos 11 800 años (Hall y Mothes, 1994; Samaniego *et al.*, 1998).

El Cayambe (latitud 00° 1.72' norte; longitud 77° 59.13' oeste; altura 5 790 metros) se ubica en la parte norte de la Cordillera Real (Oriental) de los Andes del Ecuador, a 60 km al nororiente de la capital (Quito) y a 15 km al oriente de la ciudad de Cayambe. El registro de la actividad más reciente del Cayambe incluye de 18 a 20 erupciones en los últimos 4 000 años, las mismas que están distribuidas en tres periodos de actividad volcánica (Samaniego *et al.*, 1998): El primer periodo se habría dado entre los años 3800 y 3500 a.p.; el segundo entre 2500 y 1700 años a.p.; y el último inició hace 1100 años a.p. La última erupción del Cayambe ocurrió entre los años 1785 y 1786; se la describe como una erupción subglaciar que habría producido caídas moderadas de ceniza en Cayambe (Samaniego *et al.*, 1998) y la misma habría terminado con un flujo de lava o un lahar en 1786 (Ascázubi, 1802).

Los depósitos observados en los estudios de campo corresponden principalmente a flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego *et al.*, 2004b). Todos ellos son fenómenos que pueden afectar de forma importante al normal desenvolvimiento de la actividad florícola y, consecuentemente, a la disponibilidad de empleos y a la estabilidad económica del sector. Los vestigios de las erupciones volcánicas en el pasado evidencian el riesgo que una erupción, en la actualidad representaría para las zonas de producción florícola en esta zona, tomando en consi-

deración que desde el año 2016 ha incrementado la actividad sísmica volcánico tectónica registrada en los informes especiales 1, 2, 3, 4 y 5 del 2016 y 1 y 2 del 2017 del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN, 2016; 2017); así como también la probabilidad de ocurrencia que actualmente posee el volcán Cayambe para el año 2017 es del 68% (IGEPN, 2017b).

Según Bernard y Samaniego (2017), en caso de reactivación del Cayambe, el escenario eruptivo pesimista más probable corresponde a una erupción explosiva, o a la formación de un domo o un flujo de lava viscosa, en los flancos norte, oriental y occidental. Como consecuencia, lahares primarios se dirigirían al oriente por el sistema fluvial de los ríos Salado-Quijos (Samaniego *et al.*, 2004a) y podrían (dependiendo del tamaño de la erupción) afectar la principal vía de acceso al sector nororiental del país, el Sistema de Oleoductos Trans-Ecuatoriano (SOTE), el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y al Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair.

En cuanto a la caída de ceniza, en esa zona los vientos principalmente van de oriente a occidente, por lo que los asentamientos humanos de la parte occidental podrían verse afectados por este fenómeno (Samaniego *et al.*, 2004b). Este escenario también contempla la posibilidad de que la explosión o crecimiento del domo se produzca en la cumbre o en el flanco occidental, lo que pondría en serio peligro por lahares primarios a la ciudad de Cayambe (Samaniego *et al.*, 2004b) y por caída de ceniza a la actividad florícola.

El propósito de este estudio es delimitar las zonas dedicadas a la actividad florícola que sufrirían una mayor afectación por lahares y caída de ceniza ante una eventual erupción del volcán Cayambe en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo (Figura 1) y determinar/cuantificar el impacto socioeconómico en estas zonas a través del análisis de datos censales.

Antecedentes eruptivos y definición de escenarios

A través de la revisión de estudios previos (Samaniego, 1996; Samaniego *et al.*, 1998; Samaniego *et al.*, 2002; Samaniego *et al.*, 2004a; Samaniego *et al.*, 2004b; Bernard y Samaniego, 2017) se pudo conocer la historia eruptiva del volcán, las fechas de ocurrencia de las principales erupciones, su dinámica y con ello definir escenarios del comportamiento del volcán en eventos futuros, particularmente de los fenómenos de lahares y caída de ceniza. Sin embargo, debido a la falta de información volcánofísica detallada sobre las erupciones recientes del complejo volcánico del Cayambe, para ciertos parámetros como duración, altura de la columna eruptiva, tasa de descarga y volumen de caída se utilizaron los valores definidos por Mastin *et al.* (2009) con modificaciones para ajustar los resultados a los obtenidos en las turberas en los estudios de Samaniego *et al.* (1998).

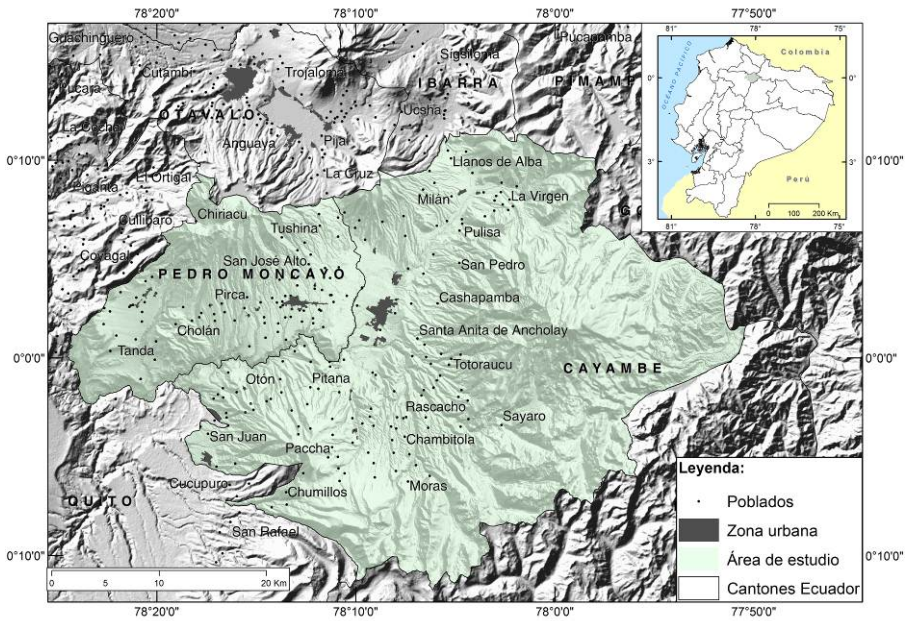


Figura 1. Localización del área en estudio.

Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía, IGM, 2012.

Para la determinación de las amenazas asociadas a la caída de ceniza y lahares del volcán Cayambe se representó una erupción volcánica con un índice de explosión volcánica $-IEV = 3-4$ (tamaño moderado), la cual es caracterizada por la formación de un domo o un flujo de lava viscosa en los flancos norte y oriental (Samaniego *et al.*, 2004b). La creación de un domo podría generar un colapso gravitacional o destrucción explosiva del mismo y con esto, formar nubes ardientes y lahares primarios producto de la fusión parcial del casquete glacial que posee el volcán Cayambe. Este escenario corresponde a una erupción de tipo peleana datada hace 380 años a.p. y se lo conoce como San Marcos-S2 (Samaniego *et al.*, 1998).

Es importante mencionar que la caída de ceniza en zonas pobladas está directamente relacionada con la velocidad y dirección del viento. Los depósitos de nubes ardientes de tipo “bloques y ceniza” cubren una superficie aproximada de 6.9 km^2 y tienen un volumen aproximado de 0.4 km^3 (Samaniego, 1996). A 4 km al suroeste de la cumbre del volcán se han identificado depósitos de caída de ceniza que superan los 150 mm. Este tipo de evento llamado San Marcos ha ocurrido en 12 ocasiones con erupciones de tamaño similar en los últimos 4 500 años, las cuales pertenecen a ocho periodos eruptivos (Samaniego *et al.*, 1998).

Como ejemplo de erupción de tamaño similar eruptivos ocurridos recientemente en el Ecuador se tomó como umbral bajo a la erupción ocurrida en agosto de 2006

con el volcán Tungurahua y en umbral alto con la erupción ocurrida en el volcán Reventador en noviembre de 2002 (Bernard y Samaniego, 2017). El escenario S2 corresponde al peor escenario probable; puesto que, el escenario La Chimba-S3 (Bernard y Samaniego, 2017) no se ha presentado en los últimos 10 000 años (Samaniego *et al.*, 2004a).

En este sentido, los parámetros utilizados corresponden a un dinamismo eruptivo tipo Peleano o Subpliniano con un IEV= 3-4, con duración de seis horas y una altura de la columna eruptiva de 11 km. Con esto lo que se obtiene es la tasa de descarga conocida de 4×10^6 kg/s y un volumen de magma 0.03 km^3 (Bernard y Samaniego, 2017).

Materiales y métodos

Determinación de zonas potencialmente afectadas por lahares

Para determinar las áreas de afectación de lahares (flujos de lodo y escombros volcánicos), se utilizaron los polígonos derivados en las simulaciones de lahares primarios y secundarios realizados por el IGEPN. Estos resultados fueron obtenidos utilizando modelos digitales de terreno-MDT (resolución de 4 y 10 metros) y el código VolcFlow (Kelfoun y Vallejo, 2015); además se realizaron correcciones topológicas y de escala con el objetivo de obtener un mapa a escala 1:10 000, validados en campo y que son coherentes con fenómenos similares ocurridos en otros volcanes tanto del Ecuador como a nivel mundial (IGEPN, 2017b).

Esta técnica permitió determinar aquellas zonas más susceptibles a ser afectadas por inundaciones de lahares en función de la trayectoria de los ríos de los drenajes occidentales correspondientes a los ríos Guachalá, Purlugara, La Chimba, Blanco y la Quebrada Tunas. Como resultado final de este proceso se obtiene un en formato shapefile, en el cual los polígonos muestran las zonas potencialmente afectadas por lahares primarios y secundarios con sus diferentes volúmenes con la probabilidad de ocurrencia (alta y baja). Para el caso de los lahares primarios, se estima que los volúmenes máximos estarían en el orden de los $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ determinado que las zonas que podrían ser potencialmente afectadas corresponden a los drenajes de los ríos Blanco y Guachalá (IGEPN, 2017b). Para el caso de los lahares secundarios, se estima que los volúmenes máximos en los drenajes de los ríos La Chimba y Guachalá serían de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ y para el drenaje del río Blanco $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (IGEPN, 2017b).

Determinación de zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza

Para la determinación de zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza se utilizó el modelo Ash 3D, el cual simula la dinámica de las nubes de cenizas volcánicas para la zonificación de las áreas potencialmente afectadas por este fenómeno (Mastin *et al.*, 2013).

Ash 3D es un modelo atmosférico euleriano tridimensional para el transporte, dispersión y deposición de tefra, desarrollado para estudiar y predecir los peligros de las nubes de cenizas volcánicas y la caída de tefra (Mastin *et al.*, 2013). Ash 3D no calcula el comportamiento de una pluma creciente, sino, inyecta tefra en una columna volcánica y los usuarios pueden especificar que las cenizas se concentren en una sola celda, distribuidas uniformemente por toda la columna o distribuidas verticalmente siguiendo la ecuación de Suzuki (1) (Suzuki, 1983; Carey, 1996):

$$\frac{dQ_m}{dy} = Q_m \frac{k^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \exp\left(k \left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)}{H[1 - (1 + k)\exp(-k)]} \quad (1)$$

Donde Q_m es la masa total del material emitida en un lapso de tiempo con un tamaño de partícula configurado, H es la altura total de la pluma, z corresponde a la elevación en el penacho y el factor de forma k , es una constante ajustable que controla la distribución de la ceniza con altura. Valores altos en la constante k concentran la masa cerca de la parte superior del penacho; mientras que, un valor bajo de k da una distribución aproximadamente uniforme de la masa con respecto a la elevación (Mastin *et al.*, 2013).

Para la modelación de caída de ceniza del volcán Cayambe se utilizaron parámetros establecidos anteriormente, con los cuales los resultados obtenidos son concordantes con los descritos en las turberas de los trabajos de campo de Samaniego *et al.* (1998). Las modelaciones se realizaron para el período 2007-2016, una simulación de erupción el día 15 de cada mes elegido por ser el más representativo, alternando el inicio del evento cada seis horas (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00) entre los meses. Con esto se obtuvo un total de 120 modelaciones, con las cuales se realizaron interpolaciones para mejorar las isopacas generadas por el programa. A continuación, se detalla la metodología utilizada para la generación de las isopacas del volcán.

Transformación de los archivos kmz (resultados de Ash 3D) en shapefile

Con cada una de las modelaciones generadas en Ash 3D, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se procedió a la automatización mediante flujos de trabajo, los cuales encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento, alimentando la salida de una herramienta como entrada en otra herramienta para la transformación de los datos. Esto con la finalidad de replicar el modelo en cada año; puesto que, los archivos originales de salida del código Ash 3D se encuentran en formato kmz. Una vez exportados los archivos a formato shapefile, se eliminó aquella información innecesaria (límite del modelo generado para cada año y mes) para el análisis de los datos.

Cambio de geometría manteniendo la información de espesores de ceniza

Eliminados los polígonos correspondientes a los límites de cada modelación, estos fueron transformados a puntos manteniendo los valores de espesores de ceniza de cada uno y posteriormente, se agregó un campo de tipo doble para almacenar la información del espesor del depósito de ceniza porque en primera instancia, se lo obtuvo de tipo texto. El código Ash 3D arroja una serie de datos en cada punto generado; por tal motivo en las modelaciones se tomaron en cuenta los datos finales disponibles en el reporte de cada mes mediante selecciones por atributos, con esto se obtuvieron aquellos datos que cumplan la condición y, posteriormente, se eliminaron los elementos y campos con información no utilizada en el procesamiento.

Automatización del proceso por año

Con la información depurada, correspondiente a los valores de los puntos extraídos de las modelaciones de Ash 3D mediante el uso de los SIG se generó un modelo para el año 2007 con la finalidad de automatizar el proceso para el periodo 2007-2016, el cual fue ejecutado desde la ventana de Python. Así, lo que se obtuvo es un archivo que servirá como base para interpolar la información generada en cada año del periodo de las modelaciones de caída de ceniza del volcán Cayambe. Posteriormente se agregó un nuevo campo en el cual se almacenó la información de caída de ceniza para los 12 meses y finalmente, se eliminaron aquellos campos innecesarios para el análisis.

*Creación de una cuadrícula fija (200*200 m) e interpolación determinista*

Con los límites de las coordenadas de las 120 modelaciones, se generó una cobertura de puntos con una distancia de 200 por 200 metros entre cada uno; esto con la finalidad de mejorar la interpolación de los datos, los cuales posteriormente se utilizaron para obtener las isopacas del volcán Cayambe. Una vez generado el archivo de puntos, se interpoló la información de cada mes para todos los años. Luego, mediante herramientas de geoprocésamiento se obtuvieron los valores de cada año en un par de coordenadas, así en una fila se obtuvo las simulaciones por mes y año por separado.

Análisis geoestadístico de los resultados para obtener mapas de probabilidades

Generado el archivo de cada año, el cual contiene la información interpolada por meses, se obtuvo mediante el uso de análisis espacial un solo archivo con las 120 simulaciones, las cuales posteriormente fueron analizadas para obtener la probabilidad de ocurrencia al 50% de caída de ceniza utilizando la mediada de los datos y con esto se generó el archivo final de las zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza del volcán. La probabilidad de ocurrencia al 50% es una de la más utilizadas en la comunidad científica (Bonadonna *et al.*, 2005; Biass *et al.*, 2016).

El resultado final de este proceso es un archivo en formato shapefile en donde los polígonos representan las zonas potencialmente afectadas por ceniza en sus distintos espesores (> 80 mm, 50 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5mm, 3mm, 1mm, > 0 mm).

Mapeo de zonas vulnerables a lahares y caída de ceniza

Con las zonas potencialmente afectadas tanto por lahares y caída de ceniza, se generó el mapa de zonas vulnerables de ambos fenómenos para los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo mediante el uso de análisis espacial y álgebra de mapas.

Autores como Yokoyama *et al.* (1984); Stieltjes y Mirgon (1998), consideran que la población representa el elemento más vulnerable frente a una amenaza, razón por la cual este factor junto con la infraestructura y la actividad económica, han sido considerados para el presente estudio. Con base en los factores establecidos (Tabla 1) para la definición de la vulnerabilidad a las amenazas volcánicas (caída de ceniza y lahares) en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo fueron: 1) demografía 2) infraestructura, 3) actividad económica.

Tabla 1
Factores de impacto

<i>Factor</i>	<i>Variable</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>	<i>Escala/ Detalle</i>
Demografía	Población Total	INEC ¹	2010	Sector Censal
	Población por área (urbana y rural)	INEC	2010	Sector Censal
Infraestructura	Construcciones dedicadas a la actividad florícola	IGM ²	2012	1:5 000
Actividad económica	Uso y cobertura de la tierra	MAGAP ³	2014	1:25 000
	Censo Nacional Florícola	MAGAP	2010	1:5 000

Identificación de infraestructuras dedicadas a la actividad florícola afectadas por lahares y la caída de ceniza

La cuantificación de áreas dedicadas a la actividad florícola cuya infraestructura puede verse afectada por lahares y caída de ceniza se determinó mediante la digitalización de edificaciones relacionadas con esta actividad. Se utilizó como insumo la fotografía aérea disponible del sector (IGM, 2012) y comprobación en campo de las

¹ Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

² Instituto Geográfico Militar.

³ Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.

edificaciones levantadas por métodos cartográficos. En este sentido, mediante foto-identificación se hizo el levantamiento de las estructuras correspondiente a edificaciones y posteriormente se catalogó la información tomando en consideración los parámetros establecidos, de acuerdo a la tabla de estructuración disponible y elaborada por el ente rector de la información Geográfica-Cartográfica del Ecuador (IGM, 2010).

De esta manera, todos los elementos mayores o iguales a una superficie de 6 m² fueron digitalizados en un archivo tipo polígono; mientras que los de menor superficie fueron representados en un archivo tipo punto a escala 1:5 000. Se digitalizaron 7 045 edificaciones de tipo punto y 14 380 de tipo polígono, las cuales se sumaron a las levantadas por métodos fotogramétricos por el IGM. Así, mediante el uso de los SIG, se levantaron un total de 26 992 puntos y 34 582 polígonos; los cuales fueron utilizados como insumo para el análisis de la infraestructura productiva y edificaciones relacionadas a la actividad florícola en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo.

Resultados

Afectación de la población por caída de ceniza y lahares

De los 118 967 habitantes de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, 69 880 se encuentran en la zona rural (58.74%); mientras que 49 087 habitantes en la zona urbana (41.26%) de acuerdo a los datos del INEC, (2010). Un total de 15 272 trabajadores se encuentran directamente relacionados a la actividad florícola en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo en lo referente a trabajos en los cultivos de flores, post cosecha, cargos administrativos y de tipo guardería según los datos obtenidos del Censo Nacional Florícola.

De este valor, el 52.97% corresponden a hombres; mientras que el porcentaje restante (47.03%) a mujeres. La mano de obra masculina predomina ligeramente en el cultivo de flores con 848 trabajadores más que mujeres, llegando a un total de 9 990 trabajadores. En lo referente a la post cosecha de las flores, la mano de obra de mujeres es mayor con 357 trabajadoras; es decir 2 054 mujeres y 1 697 hombres.

Tanto en la parte administrativa, como para guardería se evidencia que la mano de obra para el hombre es más solicitada con un 58.02% para la primera y un 88.94% en los cargos de seguridad.

Por la cantidad de habitantes afectados, es necesario implementar medidas de prevención por parte de las autoridades, con la finalidad de salvaguardar la integridad de los habitantes de los 237 poblados disponibles en la cartografía básica oficial a escala 1:5 000 del IGM. De estos poblados, 35 se verían afectados por caída de cenizas con espesores de 10 mm (13 133 habitantes), 52 con espesores de 20 mm (23 790 habitantes), 57 con espesores de 30 mm (57 081 habitantes) y ocho con espesores de

50 mm (888 habitantes) por encontrarse en zonas donde la división censal se encuentra en zonas proximales a la fuente (Figura 2).

Con respecto a los lahares provenientes del volcán Cayambe, se tendrían 49 poblados afectados por lahares secundarios (probabilidad alta de ocurrencia) y de acuerdo a la división censal del INEC llegarían a una población total de 22 267 habitantes. Para una probabilidad baja de ocurrencia (lahares primarios) del volcán Cayambe se tendrían 26 poblados con una población total de 21 461 habitantes afectados.

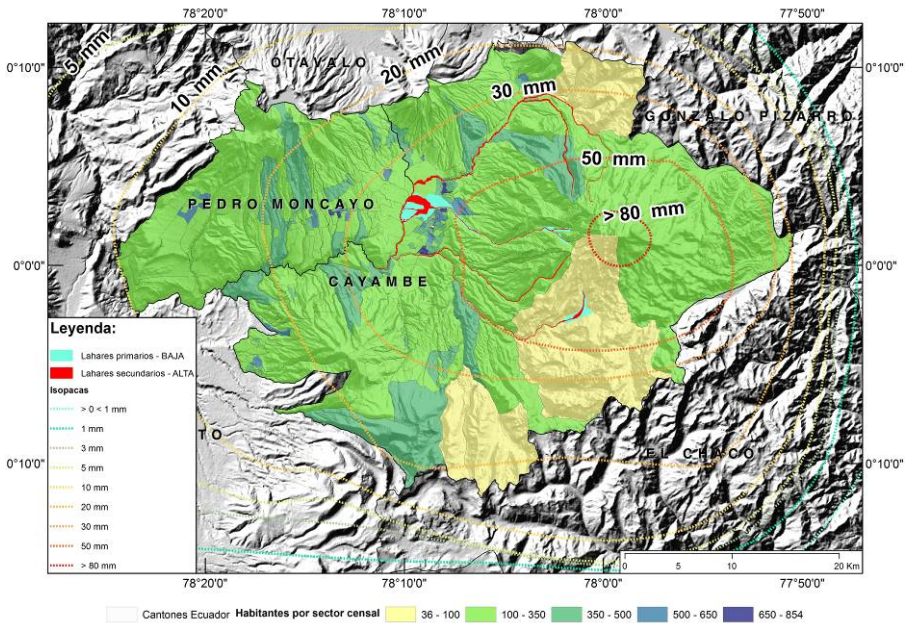


Figura 2. Habitantes afectados por caída de ceniza y lahares.
Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía, IGM, 2012.

Afectación por lahares y caída de ceniza según el uso del suelo

La caracterización del uso de suelo de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, permitió cuantificar la superficie afectada según el uso tanto por lahares como por caída de ceniza. De esta manera, la extensión de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo (153 576 ha) en su totalidad se vería afectada por la caída de ceniza proveniente del volcán Cayambe en caso de una erupción de tipo “San Marcos”; siendo los espesores de ceniza de 50 mm, 30 mm y 20 mm los que cubren el 81.46% de la superficie de los mismos; mientras que, 1.46% de la superficie, correspondientes a las áreas proximales al cráter del volcán se verían afectadas con espesores superiores a 80 mm y el

17.05% de la superficie de los cantones tendrían una afectación con espesores de 5 y 10 mm.

El 52.08% corresponde a vegetación arbustiva y herbácea con una superficie de 79 980 ha, el 32.76% a tierra agropecuaria con una superficie de 50 317 ha. La cobertura de uso de suelo bosque representa el 9.32% con una superficie de 14 320 ha; mientras que, con porcentajes inferiores pero importantes la zona antrópica representa el 3.98% de la superficie de los cantones (6 105 ha), superficies consideradas como otras áreas el 1.60% (2 455 ha) y cuerpos de agua tan solo el 0.26% con una superficie de 397 hectáreas (Figura 3).

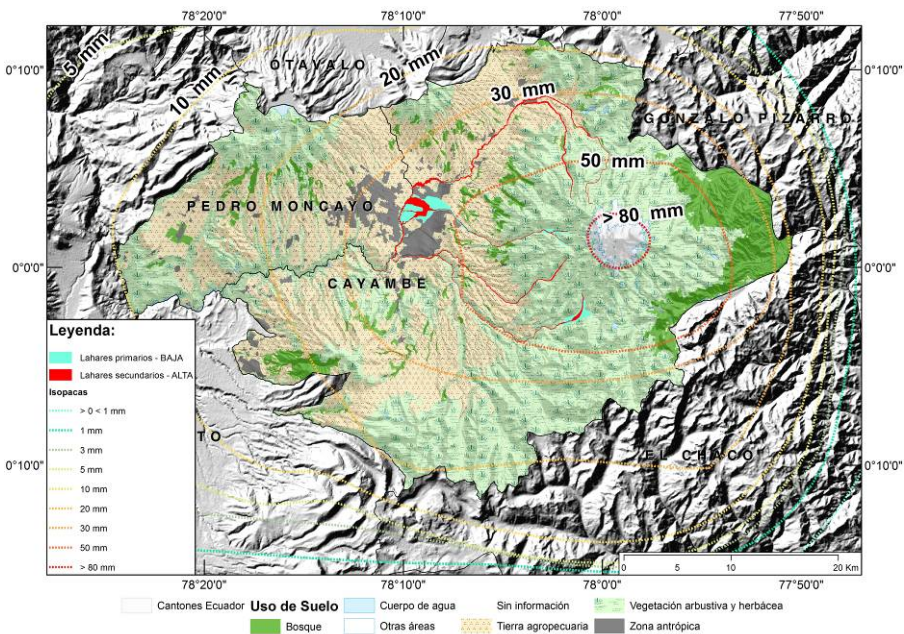


Figura 3. Afectación del uso del suelo por caída de ceniza y lahares.

Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía, IGM, 2012.

Un total de 1 160 hectáreas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, correspondientes al 0.76% de la superficie se verían afectadas por lahares proveniente del volcán Cayambe con una probabilidad de ocurrencia alta (lahares secundarios); mientras que, el 0.98% tendría una afectación con una probabilidad baja de ocurrencia (lahares primarios), correspondiente a 1 511 hectáreas. De la superficie total afectada por lahares, el 44.14% es vegetación arbustiva y herbácea, 32.57% está destinado al uso del suelo como zona urbana. Con superficies menores pero importantes, el uso

de suelo tierra agropecuaria tiene el 25.06%. Coberturas de suelo como bosque representan el 2.06%, y cuerpos de agua 0.16%.

Afectación de infraestructura y edificaciones por caída de ceniza y lahares

Mediante técnicas cartográficas se pudo levantar un total de 61 574 edificaciones en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo; de las cuales mediante foto-identificación se determinaron 13 208 edificaciones destinadas a la actividad florícola; 4 272 han sido catalogados como invernaderos y 8 936 como cobertizos. En lo referente a la caída de ceniza, 146 invernaderos y 556 cobertizos se verían afectados con espesores hasta de 50 mm; 2 619 invernaderos y 1 574 cobertizos se verían afectados con espesores de 30 mm; 1 121 invernaderos y 4 391 cobertizos tendrían afectaciones hasta de 20 mm. Por último, 386 invernaderos y 2 491 cobertizos estarían afectados con espesores hasta de 10 mm de caída de ceniza, ante una erupción del volcán Cayambe (Figura 4).

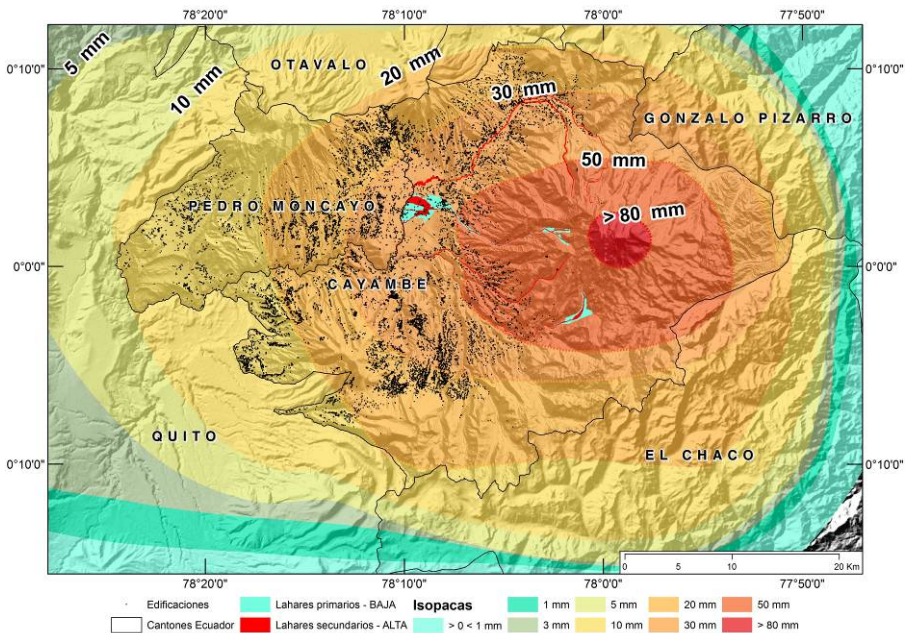


Figura 4. Infraestructura y edificaciones afectadas por caída de ceniza y lahares.
Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía, IGM, 2012.

Con respecto a los lahares secundarios (probabilidad alta de ocurrencia) se tendría una afectación de 23 invernaderos, 9 cobertizos y 71 casas; mientras que para lahares primarios (probabilidad de ocurrencia baja), correspondiente a la de mayor extensión

de lahares se tendría 236 invernaderos, 14 cobertizos y 593 casas directamente afectados. Esto se obtiene tomando en consideración aquellos invernaderos o cobertizos que se encuentran en los límites de las florícolas delimitadas en el Censo Nacional Florícola.

Afectación al sector florícola por caída de ceniza y lahares

Infraestructura productiva

La clasificación de las edificaciones permitió enfocar el análisis en aquellas infraestructuras correspondientes a invernaderos y cobertizos, ambas relacionadas con la actividad florícola. Adicionalmente, según el Censo Nacional Florícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP, 2009), a escala 1:5 000, en el área de estudio existen unas 152 florícolas con una extensión total de 3 217 hectáreas; de las cuales 1 434 hectáreas corresponden al cantón Cayambe y 1 927 hectáreas al cantón Pedro Moncayo.

Los 152 predios correspondientes a las florícolas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo levantados por el MAGAP en el Censo Nacional Florícola (Figura 5), se los ha dividido en tres grandes grupos según su superficie:

- Pequeños (total de 13): aquellos predios cuya superficie se encuentra entre 0 y menor a 3 hectáreas. 6 florícolas tendrían afectaciones con espesores de 20 mm y 7 florícolas serían afectadas con espesores de 30 mm.
- Medianos (total de 92): corresponden a superficies de florícolas entre 3 y 20 hectáreas. 8 florícolas tendrían afectaciones con espesores de 10 mm, 25 florícolas serían afectadas con espesores de 20 mm y 68 florícolas afectadas con espesores 30 mm. Con respecto a la probabilidad de ocurrencia de lahares, 10 florícolas afectadas por lahares primarios; mientras que, 9 serían afectadas por lahares secundarios.
- Grandes (total de 47): predios cuya superficie supera las 20 hectáreas. 3 florícolas se verían afectadas con espesores de 10 mm, 7 florícolas serían afectadas con espesores 20 mm, 35 florícolas podrían verse afectadas con espesores de 30 mm y 2 florícolas con espesores de 50 mm. Con respecto a la probabilidad de ocurrencia de lahares, 8 florícolas serían afectadas por lahares primarios; mientras que, 9 florícolas serían afectadas por lahares secundarios.

Producción

Los suelos de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, por sus condiciones favorables, están destinados a la producción florícola, siendo esta actividad uno de los principales ingresos económicos para la zona y también rubro de exportación importante para el país y de acuerdo a los datos disponibles para el año 2014 alcanzó la cifra de 798 millones de dólares (EXPOFLORES, 2015). Según los datos del Censo Nacional

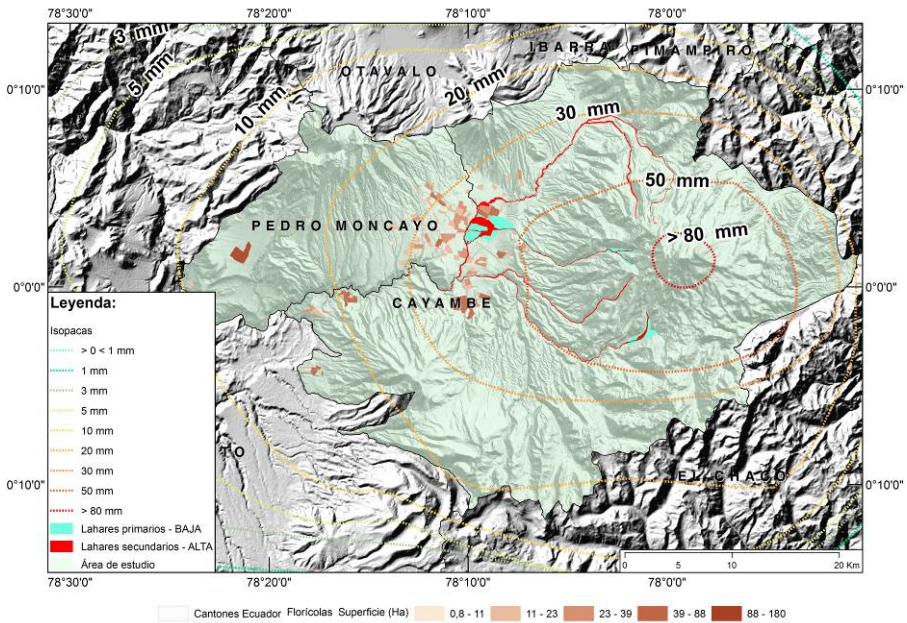


Figura 5. Florícolas potencialmente afectadas por caída de ceniza y lahares.
Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía, IGM, 2012.

Florícola (MAGAP, 2009) se evidencia una diversificación de las florícolas según el tipo de flor que se producen en las nueve parroquias dedicadas a esta actividad.

De lo antes expuesto, se demuestra que las florícolas del cantón Cayambe destinan 670 ha para el cultivo de rosas, 25 ha para flor de verano y 24 ha para claveles. Mientras que las florícolas del cantón Pedro Moncayo destinan 707 ha para el cultivo de rosas, 6 ha para flor de verano y 19 ha para claveles.

En el año 2009, el MAGAP determinó el costo aproximado de las florícolas encuestadas en el Censo Nacional Florícola, cuyos valores ascienden a 150 000 dólares estadounidenses (USD) por hectárea; de los cuales, el 45% del valor corresponde a las plantas; seguido por la infraestructura de invernaderos con el 25%, el tercer lugar concierne al valor de la tierra con el 20% y finalmente, el 10% representan las construcciones.

Estos valores son considerables en caso de una erupción del volcán Cayambe ya que las florícolas con mayor valor de la provincia de Pichincha se encuentran en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo, potencialmente afectados por caída de ceniza y lahares.

Con los datos obtenidos del Censo Nacional Florícola se determinó que los valores de las florícolas varían entre 27 000 hasta 15 millones de dólares, correspondiente

a las fincas donde se cultivan flores de verano y rosas, respectivamente (MAGAP, 2009). Aproximadamente, el 45% de las fincas tienen un valor que oscila entre uno y cinco millones de dólares, seguido con el 40%, que les corresponde el grupo de aquellas que tienen un valor entre 150 000 y 1 000 000 de dólares; mientras que el 12% tienen valores menores a 150 000; y finalmente el 3% tienen valores que superan los 5 millones de dólares (MAGAP, 2009); las cuales tendrían un grado de afectación desde pérdidas parciales a totales en el caso de lahares, dependiendo del evento.

De esta manera, con la información recopilada (MAGAP, 2009) se estimó el costo promedio de pérdidas en las florícolas (Figura 6), en aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm las plantas e invernaderos tendrían una afectación considerable (Jenkins *et al.*, 2015), llegando a superar los 200 millones de dólares en pérdidas de plantas y 120 millones de dólares en los invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se dan en los suelos, los cuales serían enterrados por flujos de lodo y con esto, se estiman pérdidas de entre los 15 millones de dólares en el caso de lahares secundarios y 45 millones de dólares adicionales en lahares primarios.

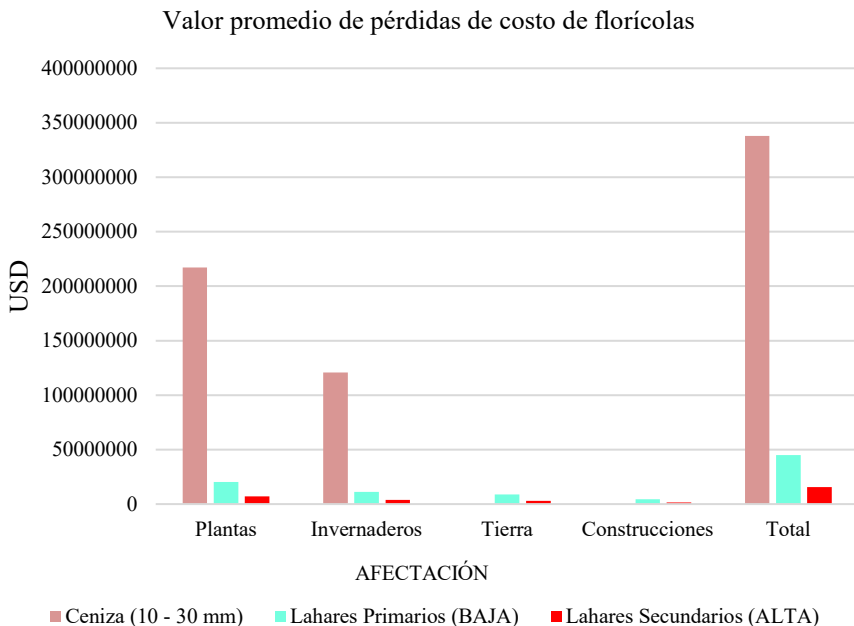


Figura 6. Estimación de pérdidas en costos (USD) por caída de ceniza y lahares.

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio con respecto a las simulaciones de caída de ceniza mediante el uso del código Ash 3D en el periodo 2007-2016 e interpolaciones de los datos, han permitido la actualización de las amenazas volcánicas relacionadas a cenizas del volcán Cayambe. Dichos datos han sido validados por especialistas del IGEPN para utilizarlos en la actualización del mapa de amenazas del volcán Cayambe; lo que demuestra que el avance de la tecnología e insumos actualizados permiten modelar con mayor precisión los peligros asociados a las amenazas volcánicas y con ello, tener mejores insumos para la toma de decisiones y gestión de riesgos.

Pese a la actualización de la información de la amenaza volcánica, tanto para lahares como caída de ceniza, es necesario mencionar que los datos de carácter socioeconómico disponibles utilizados para este estudio no presentan la misma actualización. Esto ha dificultado una cuantificación más precisa del impacto social y económico en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo ante una eventual erupción. Eso plantea la necesidad de contar con sistemas de información social y económica con una actualización periódica.

Otro aspecto importante es el nivel de detalle de la información cartográfica disponible, la cual solo incluye un levantamiento de las edificaciones, pero no respecto de su estado y año de construcción, aspectos importantes para el análisis de vulnerabilidad de las mismas.

Los datos relacionados con la actividad florícola y sus costos han sido limitados, esto por la falta de apertura de cuentas de los dueños en el Censo Nacional Florícola, de allí que la cuantificación de las pérdidas sea solo referencial y debe ser considerado como valores mínimos. Asimismo, se sugiere que la cuantificación del impacto económico considere la época del año, factor importante si se toma en cuenta que, en ciertas fechas como San Valentín, Día de la madre y Año nuevo, existe un considerable incremento de las ventas para los floricultores.

A pesar de la falta de información social y económica actualizada, el presente estudio sirve para cuantificar el impacto socioeconómico que representa el Cayambe para las poblaciones aleñadas. De igual manera, puede replicarse en otras áreas o diferentes volcanes y con esto, brindar insumos necesarios para la gestión del riesgo y la planificación.

Conclusiones

El modelo de transporte, dispersión y deposición de tefra, Ash 3D, se utilizó para simular los peligros de las nubes de ceniza y la caída de tefra para el periodo 2007-2016 y con esto proporcionar una herramienta eficiente y confiable para la evaluación de la amenaza volcánica por caída de ceniza. Después de un análisis cuidadoso del

modelo, podemos concluir: los tiempos de computación cortos que caracterizan la automatización de procesos también permiten una evaluación totalmente probabilística basada en: 1) un muestreo estocástico de los parámetros de entrada y 2) un análisis probabilístico de los posibles resultados.

Debido a los vientos dominantes con dirección principal hacia el occidente, es probable que sectores ubicados al norte, oriente y sur del Cayambe reciban poca caída de ceniza de una erupción tipo San Marcos. Por lo tanto, ciudades como San Miguel de los Bancos, Sangolquí, Puerto Quito, Pedro Vicente Maldonado, Urcuquí, Pimampiro, El Chaco, Santo Domingo, La Concordia, Lumbaqui y Baeza están relativamente a salvo de la amenaza por caída de tefra del volcán Cayambe.

Las localidades más afectadas son algunas ciudades clave para la producción de flores como Cayambe, Pedro Moncayo y Tabacundo que se encuentran al occidente del volcán Cayambe, que es probable que experimenten daños a la vegetación con espesores de ceniza de 20-50 mm en el escenario considerado y también el colapso parcial de la infraestructura dedicada a la actividad florícola como los invernaderos y cobertizos de las zonas proximales al volcán.

En lo referente a los lahares, 28 947 habitantes afectados, 49 poblados afectados por lahares secundarios con una probabilidad alta de ocurrencia y 26 poblados afectados por lahares primarios con una probabilidad de ocurrencia baja.

El 61% de los invernaderos (2 619) se verían afectados con espesores de hasta 30 mm; 1 121 construcciones, que representan el 26% se verían afectadas con espesores de 20 mm, 9% de los invernaderos (386) tendrían afectaciones de hasta 10 mm y el 3% (146 invernaderos) estarían afectados con espesores de hasta 50 mm.

Con respecto a los lahares secundarios se tendría una afectación de 103 edificaciones (23 invernaderos, 9 cobertizos y 71 casas); mientras que para lahares primarios se tendría 843 edificaciones directamente afectadas divididas en 236 invernaderos, 14 cobertizos y 593 casas directamente afectados.

Los costos promedio de pérdidas en las florícolas en aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm, llegando a superar los 200 millones de dólares en pérdidas de plantas y 120 millones de dólares en los invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se dan en las plantas, invernaderos y en los suelos, los cuales serían enterrados por flujos de lodo y con esto, se estiman pérdidas de entre los 15 millones de dólares en el caso de lahares secundarios y 45 millones de dólares en lahares primarios.

La amenaza de dispersión y caída de cenizas volcánicas en el Ecuador es un fenómeno que amerita ser estudiado y monitoreado a profundidad considerando, que en la actualidad las poblaciones dedicadas a actividades primarias como las ganaderas y agrícolas se encuentran ubicadas en zonas proximales a los volcanes por la fertilidad que los suelos presentan por erupciones volcánicas ocurridas en el pasado.

Agradecimiento

CONICYT/FONDAP/15110017, Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN).

Referencias

- Ascázubi J. (1802). "Letter to Baron von Humboldt", *Von Humboldt A, Briefe aus Amerika, 1799-1804*, Herausgegeben von Ulrike Moheit, Akademik Verlag, Berlin, 1993.
- Bernard B. y Samaniego P. (2017). *Escenarios eruptivos en el volcán Cayambe y construcción de un árbol de eventos: Extended abstract volume of the 8th JCT*, Quito, Ecuador, p. 5.
- Bias S., Bonadonna C., Traglia F., Pistolesi M., Rosi M. and Lestuzzi P. (2016). "Probabilistic evaluation of the physical impact of future tephra fallout events for the Island of Volcano, Italy", *Bull Volcanol*, 78:37. En 10.1007/s00445-016-1028-1.
- Bonadonna C., Connor C., Houghton B., Connor L., Byrne M., Laing A. and Hincks T. (2005). "Probabilistic Modeling of Tephra Dispersal: Hazard Assessment of a Multiphase Rhyolitic Eruption at Tarawera, New Zealand", *J Geophys Res-Solid Earth*. En 110:B03203.
- Carey S. (1996). "Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions", in Scarpa, L.A. and Tilling, R.I. (eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*, Berlin, Springer Verlag, pp. 429-463.
- EXPOFLORES —Asociación Nacional de Productores y Exportadores de Flores, (2006).
- Hall M. and Mothes P. (1994). *Tefrostratigrafía Holocénica de los volcanes principales del Valle Interandino, Ecuador: El contexto geológico del espacio físico Ecuatoriano*, R. Marocco (ed.), Corporación Editora Nacional y Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, Ecuador, pp. 47-67.
- IGEPN, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (2016). "Informe Especial - Volcán Cayambe N° 1". Disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/15310-informe-especial-volcan-cayambe-n-1/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.
- (2016). "Informe Especial – Volcán Cayambe N° 2". Disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16585-informe-especial-volcan-cayambe-n-2/file>>.
- (2016). "Informe Especial – Volcán Cayambe N° 3". Disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16567-informe-especial-volcan-cayambe-n-3/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.

- (2016). “Informe Especial – Volcán Cayambe N° 4”, disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16657-informe-especial-volcan-cayambe-n-4/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.
- (2016). “Informe Especial – Volcán Cayambe N° 5”, disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16780-informe-especial-volcan-cayambe-n-5/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.
- (2017). “Informe Especial – Volcán Cayambe N° 1”, disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17196-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-1/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.
- (2017). “Informe Especial – Volcán Cayambe N° 2”, disponible en: <<http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17425-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-2/file>>, consultado el 15 de abril de 2017.
- (2017b). Actualización del mapa de amenazas por lahares del volcán Cayambe.
- IGM, Instituto Geográfico Militar (2010). *Catálogo de objetos del Instituto Geográfico Militar para Cartografía Base Escala 1:5 000*, Ecuador.
- (2012). Ortofoto Cantones Cayambe y Pedro Moncayo, Ecuador.
- INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2010). VII Censo de Población y VI de Vivienda, Ecuador.
- Jenkins S., Wilson T., Magill C., Miller V. and Stewart C. (2015). “Volcanic ash fall hazard and risk: Technical Background Paper for the UNISDR 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction”, Global Volcano Model and IAVCEI.
- Kelfoun K. and Vallejo S. (2015). *VolcFlow capabilities and potencial development for the simulation of lava flows*.
- MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (2009). *Censo Nacional Florícola*.
- Mastin L., Guffanti M., Servranckx R., Webley P., Barsotti S. et al. (2009). “A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions”, *J Volcanol Geotherm Res*, 186:10-21. En: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Mastin L., Randall M., Schwaiger H. and Denlinger R. (2013). “User’s guide and reference to Ash3d—A three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition”, U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1122.
- Martínez L. (1994). *Los campesinos-artesanos en la sierra central: el caso de Tungurahua*, CAAP, Quito.
- Samaniego P. (1996). “Estudio vulcanológico y petrológico de la historia reciente del volcán Cayambe”, tesis Ing. Geólogo, Escuela Politécnica Nacional.

- Samaniego P., Monzier M., Robin C. and Hall, M.L. (1998). "Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador", *Bulletin of Volcanology*, 59, pp. 451-459.
- Samaniego P., Martin H. and Monzier C. (2002). *Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions*.
- Samaniego P., Robin C., Monzier C., Eissen J. Mothes P. y Hall M. (2004a). *El Complejo Volcánico Cayambe, Síntesis geológica, actividad holocénica y evaluación de los peligros volcánicos*, Investigaciones en Geociencias, Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Samaniego P., Eissen J., Monzier M., Robin C., Alvarado A. y Yepes H. (2004b). *Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe*, Instituto Geofísico, Quito, 95 pp.
- Stieltjes L. et Mirgon C. (1998). "Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques. Test d'application sur les réseaux de la Martinique", Rapport de synthèse. BRGM, R40098, 218 pp.
- Suzuki T. (1983). "A theoretical model for dispersion of tephra", in: D. Shimozuru, I. Yokoyama (eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93-113.
- Yokoyama I., Tilling R. and Scarpa R. (1984). *International mobile early-warning system(s) for volcanic eruptions and related Seismic activities*, UNESCO, Paris, FP/2106-82-01(2286), 102 pp.

Comparison of maximum likelihood estimators and regression models for burn severity mapping in Mediterranean forests using Landsat TM and ETM+ data

Alexander Ariza*
Javier Salas Rey**
Silvia Merino de Miguel***

Received July, 2018; accepted October 10, 2018

Abstract

During the last decade, there has been a growing number of published works about burn severity of forest fires using remote sensing data for both natural resources management and research purposes. Many of these studies quantify changes between pre- and post-fire vegetation conditions from satellite images using spectral indices; however, there is an active discussion about which of the most commonly used indices is more suitable to estimate burn severity, and which methodology is the best for the estimation of severity levels. This study proposes and evaluates a Maximum Likelihood Estimation (MLE) Automatic Learning Algorithm for mapping burn severity as an alternative to regression models. We developed both these methods using GeoCBI (Geometrically structured Composite Burn Index) field data, and six different spectral indices (derived from Landsat TM and ETM+ images) for two forest fires in central Spain. We compared the capability to discriminate burn severity of these indices through a spectral separability index (M), and evaluated their concordance with GeoCBI-based field data using the coefficient of determination (R²). Afterwards, the selected index was used for the regression and MLE models for estimating burn severity levels (unburned, low, moderate, and high), and validated with field data. The

* Universidad de Alcalá (UAH), Madrid, España, correos electrónicos: alexanderariza@edu.uah.es, alexanderariza@gmail.com

** UAH, Madrid, España, correo electrónico: javier.salas@uah.es

*** Universidad Politécnica de Madrid, UPM, Madrid, España, correo electrónico: silvia.merino@upm.es

RBR index showed a better spectral separability (average between two fires $M= 2.00$) than dNBR ($M= 1.82$) and RdNBR ($M= 1.80$). Additionally, GeoCBI had a higher adjustment with RBR ($R^2= 0.73$) than with RdNBR ($R^2= 0.72$) and dNBR ($R^2= 0.71$). Finally, MLE showed the highest overall classification accuracy ($Kappa= 0.65$), and the best accuracy for each individual class.

Key words: *Regression models, Maximum likelihood, GeoCBI, dNBR, RdNBR, RBR.*

Resumen

Durante la última década, ha habido un número creciente de trabajos publicados sobre la gravedad de los incendios forestales utilizando datos de teledetección para fines de gestión de recursos naturales y de investigación. Muchos de estos estudios cuantifican los cambios entre las condiciones de vegetación antes y después del incendio a partir de imágenes satelitales utilizando índices espectrales; sin embargo, hay una discusión activa sobre cuál de los índices más comúnmente usados es más adecuado para estimar la severidad de la quemadura, y qué metodología es la mejor para la estimación de los niveles de severidad. Este estudio propone y evalúa un algoritmo de aprendizaje automático de Estimación de Máxima Verosimilitud (EMV) para mapear la severidad de las quemaduras como una alternativa a los modelos de regresión. Desarrollamos ambos métodos usando datos de campo de GeoCBI (Índice Compuesto de Quema Geométricamente Estructurado, siglas en inglés) y seis índices espectrales diferentes (derivados de imágenes Landsat TM y ETM+) para dos incendios forestales en el centro de España. Comparamos la capacidad para discriminar la severidad de la quemadura de estos índices a través de un índice de separabilidad espectral (M), y evaluamos su concordancia con datos de campo basados en GeoCBI usando el coeficiente de determinación (R^2). Posteriormente, el índice seleccionado se utilizó para los modelos de regresión y la EMV para estimar los niveles de severidad de quema (sin quemar, bajo, moderado y alto), y se validó con datos de campo. El índice RBR mostró una mejor separabilidad espectral (promedio entre dos fuegos $M= 2.00$) que el dNBR ($M= 1.82$) y RdNBR ($M= 1.80$). Además, GeoCBI tuvo un mayor ajuste con RBR ($R^2= 0.73$) que con RdNBR ($R^2= 0.72$) y dNBR ($R^2= 0.71$). Finalmente, la EMV mostró la mayor precisión de clasificación general ($Kappa= 0,65$) y la mejor precisión para cada clase individual.

Palabras clave: *Modelos de regresión, Máxima Verosimilitud, GeoCBI, dNBR; RdNBR, RBR.*

Resumo

Durante a última década, surgiu um número crescente de trabalhos publicados sobre a gravidade dos incêndios florestais utilizando dados de sensoriamento remoto para

fins de gestão de recursos naturais e de investigação. Muitos destes estudos quantificam as mudanças entre as condições de vegetação antes e depois do incêndio a partir de imagens de satélites utilizando índices espectrais; entretanto, há uma discussão ativa sobre qual os índices mais comumente usados é mais adequado para estimar a severidade do incêndio, e que metodologia é a melhor para a estimação dos níveis de severidade. Este estudo propõe e avalia um algoritmo de aprendizagem automático de Estimação de Máxima Verosimilitude (EMV) para mapear a severidade dos incêndios como uma alternativa aos modelos de regressão. Desenvolvemos ambos os métodos usando dados de campo de GeoCBI (Índice Composto de Queima Geometricamente Estruturado, siglas em inglês) e seis índices espectrais diferentes (derivados de imagens Landsat TM e ETM+) para dois incêndios florestais no centro da Espanha. Comparamos a capacidade para discriminar a severidade do incêndio destes índices através de um índice de separabilidade espectral (M), e avaliamos sua concordância com dados de campo baseados no GeoCBI usando o coeficiente de determinação (R2). Posteriormente, o índice selecionado foi utilizado para os modelos de regressão e a EMV para estimar os níveis de severidade de queima (sem queima, baixo, moderado e alto), e se validou com dados de campo. O índice RBR mostrou uma melhor separabilidade espectral (média entre dois incêndios $M= 2.00$) que o dNBR ($M= 1.82$) e RdNBR ($M= 1.80$). Além disso, GeoCBI teve um maior ajuste com RBR ($R2= 0.73$) que com RdNBR ($R2= 0.72$) e dNBR ($R2= 0.71$). Finalmente, a EMV mostrou a maior precisão de classificação geral ($Kappa= 0,65$) e a melhor precisão para cada classe individual.

Palavras chave: *Modelos de regressão, Máxima Verosimilitude, GeoCBI, dNBR; RdNBR, RBR.*

Introduction

Wildfire is a primary disturbance phenomenon with 200-500 million hectares burned annually across the globe (Amraoui *et al.*, 2013). Fire affects large areas in almost all kinds of terrestrial ecosystems, so it is a more widespread phenomenon than any other natural disturbance (Ichoku *et al.*, 2008 and Smith *et al.*, 2016). In some cases, e.g. savannas and grasslands, fire plays an ecologically significant role in biogeochemical cycles and disturbance dynamics (Montealegre *et al.*, 2014), influencing the temporal variability in carbon, water, and energy fluxes; however, in other cases, fire may lead to both long-term destruction of the vegetation cover and land degradation. In the European countries of the Mediterranean Basin, fire is a major hazard with an average of 45,000 fires per year which affect 0.5 million hectares (Montealegre *et al.*, 2014 and Quintano *et al.*, 2017).

Fire has a significant effect on both functioning and composition of ecosystems, and in landscape structure, it affects the quality of soil, air and water, and has important impacts on human health, lives and properties (San-Miguel-Ayán et al., 2013). In Spain, during the last decade (2000-2010), there has been a clear decrease in the number of fires, along with an increase in the occurrence of large fires (>100 ha) (Montealegre et al., 2014 and Eleazar, 2013). Besides, in 2012, 64% of the total burned area corresponded to a single large fire (Montealegre et al., 2014). This increase in the number of large wildfires might be due to an increase in fuel continuity, which in turn is due to changes in land use during recent decades (Pausas et al., 2008). Even though many Mediterranean species exhibit different fire-adaptive strategies, human-induced changes in land use are making many landscapes more vulnerable to high-intensity wildfires (Collins et al., 2013). At a local scale, these effects vary across the landscape depending on factors such as fire intensity, fire and burn severity, fire recurrence and fire return interval (Cocke et al., 2005 and Viedma et al., 2015).

Information about fire effects on ecosystems is useful to ecologists and land managers who want to understand vegetation recovery and succession, and to plan future restoration works (Roy et al., 2006). Besides, fire-induced severity can help to reduce uncertainty in total gas emissions estimations from biomass burning (Holden et al., 2005), water quality determination, and radiation budget assessment (Quintano et al., 2017 and Keeley, 2009). Severity mapping can be useful for highlighting the most affected areas, and explore ecological responses before and after the fire (Chuvieco, 2009). Fire causes significant changes, as vegetation consumption and charring, destruction of leaf chlorophyll, exposure of soil, and alteration of both above- and below-ground moisture (White et al., 1996). Fortunately, most of these changes induce spectral variations that can be captured by some of the available satellite sensors (Chuvieco, 2009; White, 1996 and Lentile et al., 2006). In fact, satellite data has been used for decades to assess many factors related to fire (Lentile et al., 2006).

Within the remote sensing community, severity has been related to vegetation consumption, alteration of soil properties and long-term post-fire vegetation mortality and recovery, among others (Lentile et al., 2006). In particular, fire severity has been traditionally associated with active fire characteristics and immediate post-fire effects; whereas burn severity incorporates both short- and long-term effects (De Santis et al., 2007). For many authors, burn severity is related to the amount of time necessary to return to previous state and functionality (Lentile et al., 2006). In this paper, we focus on burn severity and define it as the way to identify the impact of fire on soil and plants once the fire is extinguished, consequently being related to what is left (post-fire phase) (De Santis et al., 2007).

There is a wide range of remote sensing platforms along with different methods for determining burn severity (Parsons *et al.*, 2010), most of them including the use of post-fire field data (De Santis *et al.*, 2007). Many studies have demonstrated the sensitivity of various spectral bands to significant changes in the radiance of burned vegetation. In particular, visible, near-infrared (NIR), and short-wave infrared (SWIR) channels have been profusely used in the study of fire effects on vegetated areas (White *et al.*, 1996; Miller and Quayle, 2015 and Key and Benson, 2006). NIR reflectance is primarily sensitive to the spongy mesophyll layer at the leaf level (Knippling, 1970), while SWIR to water content, ash cover, and soil mineral content (Chuvieco, 2009 and Miller and Quayle, 2015). On the other hand, reflectance in the visible region depends on chlorophyll content. These bands have been used to study fire effects individually, or summarized in spectral indices of two mainly categories: vegetation or burned area indices. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been related to field measurements of burn severity (Chafer *et al.*, 2004), while the Normalized Burn Ratio (NBR), proposed by Key and Benson (Key and Benson, 2002), is the most effective NIR-SWIR index for burn severity available in the literature (De Santis *et al.*, 2007). These two indices are defined as:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

$$NBR = \frac{\rho_4 - \rho_7}{\rho_4 + \rho_7} \quad (2)$$

Where ρ_{NIR} and ρ_{RED} are the reflectance of NIR and red bands respectively, while ρ_4 and ρ_7 are the reflectance of band 4 (NIR) and band 7 (SWIR) of Landsat TM.

Since burn severity depends on pre-fire conditions, estimation techniques should rely on a temporal evaluation of the vegetation cover. Consequently, some authors suggested the use of differential indices like the dNDVI (NDVI pre-fire minus NDVI post-fire) or the dNBR (NBR pre-fire minus NBR post-fire), proposed by Key and Benson (Key and Benson, 2002). Using this absolute change detection algorithm, barren areas unchanged by fire would not appear as high severity areas (Key and Benson, 2006). However, the use of differential indices does not solve one of the disadvantages of using continuous variables, which is the ambiguity in the definition of threshold values of severity classes. As shown in Table 1, different dNBR threshold values might correspond to the same field-based severity classes, leading to need of undergoing a calibration process for every new application of the procedure (Miller and Quayle, 2015 and Miller and Thode, 2007).

Table 1
Variability in the definition of the thresholds of burn severity
through the dNBR spectral index

Study	Region	Severity level			
		Unburned	Low	Moderate	High
Parker <i>et al.</i> (2015)	Australia	<77	78-257	258-427	>428
Miller and Thode (2007)	California, USA	<41	41-176	177-366	>367
Key and Benson (2006)	South of Canada	<99	100-269	270-659	>660
Hoscilo <i>et al.</i> (2013)	Indonesia	<53	54-213	214-550	>550
Montealegre <i>et al.</i> (2014)	Spain	<81	82-198	199-545	>545

With the objective of overcoming some of the mentioned disadvantages, Miller and Thode (Miller and Thode, 2007) presented a relativized version of dNBR, called the Relative dNBR (RdNBR). An index, as described by Parks *et al.* (2014), is a metric of relative change (rather than absolute change), thus it emphasizes change relative to the amount of pre-fire vegetation cover. Posteriorly, a new Landsat-based burn severity metric arose: the Relativized Burn Ratio (RBR), which provided an alternative to dNBR and RdNBR; this new index, developed by Parks *et al.* (2014), showed a higher capability for detection change, even where pre-fire vegetation cover was low. These two indices are defined as:

$$RdNBR = \frac{NBR_{PRE-FIRE} - NBR_{POST-FIRE}}{\sqrt{ABS(NBR_{PRE-FIRE}/1000)}} \quad (3)$$

$$RBR = \frac{dNBR}{NBR_{PRE-FIRE} + 1.001} \quad (4)$$

Reliable estimations of burn severity are only possible using remotely sensed information in combination with field data. Field estimations of severity are usually based on visual observations of the effects of fire on soil and vegetation, and on the assessment of a set of related parameters (De Santis and Chuvieco, 2009). Among the available methods, the Composite Burn Index (CBI) developed by Key and Benson (Key and Benson, 2002) within the FIREMON (Fire Effects Monitoring and Inventory Protocol) project, and its modified version, the Geometrically structured CBI (GeoCBI) (De Santis and Chuvieco, 2009), have been used widely as operational tools. Both field indices present two main advantages: firstly, they visually assess the magnitude of change in five individual strata (substrate, grasslands/low shrubs, tall

shrubs/saplings, understory trees, and canopy trees), and integrate them in a synoptic score (ranging from 0: unburned, to 3: highest severity) for the whole plot area (Key and Benson, 2006 and De Santis and Chuvieco, 2009). Secondly, these indices were designed to be used in conjunction with the satellite data. The GeoCBI index was preferred in this work since it is more consistently related to spectral reflectance than CBI for different ranges of burn severity (De Santis and Chuvieco, 2009).

Burn severity mapping techniques that use different calibration procedures between spectral indices (NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, RdNBR, RBR) and field data (CBI, GeoCBI), have become more common in recent years (Miller and Quayle, 2015). Nonetheless, this is a rather difficult task since it is not always straightforward to relate field data to fire effects on satellite images (Miller and Quayle, 2015; Miller and Thode, 2007; Parks *et al.*, 2014 and De Santis and Chuvieco, 2009). In particular, remotely sensed data cannot always explain field-based burn severity through regression models, since the latter also depend on factors such as ecosystem type, vegetation structure or spatial distribution, among others. For this reason, the identification of complex fire patterns and its understanding from satellite data is a key issue in burn severity mapping research programs; and in this regard, data-driven artificial intelligence and machine-learning techniques are being increasingly used to classify multispectral remotely sensed data for practical applications in wildfire monitoring (Meng *et al.*, 2017 and Kern *et al.*, 2017).

In this study, we propose and evaluate a new burn severity mapping algorithm from Landsat spectral indices and field-based data, for the assessment of two forest fires of different characteristics (size and level of damage) in Spain. Specifically, we present an enhanced methodological approach based on a Supervised Classification by Maximum Likelihood Estimation (MLE), strengthening this method with a proposal for the reduction of the adjust error (compared against traditional regression models) and the evaluation of how this affects the classification accuracy. Within this framework, the objectives of this research were: a) to determine the remote sensing indices with the best performance for burn severity mapping in two different forest fires in Mediterranean ecosystems, and b) to evaluate the accuracy of spectral index-based supervised classification and regression models for burn severity mapping. These objectives are conceived as developing methods for burn severity mapping by land management agencies.

Materials and Methods

Study Area

The two study areas were located in central Spain. The first one was located in the south-western part of the Province of Madrid (Pantano de San Juan area), while the second one was located in the north-eastern part of the Province of Guadalajara (Riba

de Saelices area) (Figure 1). The Madrid fire burned a total area of 850 ha. The area was covered by pine forests (*Pinus pinaster*), and mixed forests of pine and an evergreen oak (*Quercus ilex*). The topography is abrupt and the altitudes range between 450 m and 1330 m. This region has a moderate-dry climate with annual precipitation of approximately 435 mm, and the average annual temperature is 13 °C (Ariza, 2017). The Guadalajara fire burned a total area of 13,000 ha. The fire started on July 16, 2005 and lasted 4 days. The area was covered by pine forests (*Pinus pinaster*), and mixed forests of pine with semi-deciduous oaks (*Quercus pyrenaica* and *Quercus faginea*). A large part of the burned area belonged to a protected area called the Alto Tajo Nature Park. The topography is rugged and the altitudes range between 1000 m and 1400 m. Rainfall in this region, which is evenly distributed through the year, averages 650 mm per year, and the average annual temperature is 10.2 °C (Viedma et al., 2015). Table 2 summarizes the main characteristics of the two wildfires.

Table 2
Summary of the two wildfires analyzed in this study

Fire name	Location	Burning dates	Burned area (ha)	Dominance of species	Elevation (m)
Madrid	Pantano de San Juan	26-27/June/2003	850	<i>Pino pinea</i> , <i>Quercus ilex</i>	450-1330
Guadalajara	Riba de Saelices	16-19/July/2005	13000	<i>Pino pinaster</i> , <i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Quercus faginea</i>	1000-1400

Field data

Field-based assessment of burn severity was done according to the standard protocol of the Geometrically structured Composite Burn Index (GeoCBI), as proposed by De Santis and Chuvieco (2009). This index takes into account the fraction of coverage (FCOV) of each stratum used to compute the original CBI (Key and Benson, 2006), as well as the changes in the leaf area index (LAI) (De Santis and Chuvieco, 2009). GeoCBI is defined as:

$$GeoCBI = \frac{\sum_{m_1}^{m_n} (CBI_m - FCOV_m)}{\sum_{m_1}^{m_n} FCOV_m} \quad (5)$$



Figure 1. Study area, fire perimeter, and field plots location: a) Madrid fire, and b) Guadalajara fire. Digital Elevation Models and Administrative Maps used as background, the fire perimeters were obtained from Landsat data processing as explained in Section 2.8.

Where m refers to each vegetation stratum and n is the number of strata. For the calculation of the GeoCBI each stratum is weighted by its FCOV value except for substrate, and the percentage of changes in the LAI is estimated for three strata (tall shrubs/saplings, understory trees, and canopy trees). Finally, the amount of new sprouts is added to the original estimation since it can significantly modify background reflectance; as a result, GeoCBI assigns a burn severity level (unburned, low, moderate, high) to each plot according to its final score (a number between 0.0 and 3.0), as stated in the protocol designed by De Santis and Chuvieco (2009).

Field plot locations were selected via stratified random sampling. Burn severity (derived from previous field trips), forest cover (derived from ancillary cartography and ortho-photographs), and accessibility determined the plot locations. GeoCBI field measurements were sampled in a maximal interval of twenty-five days after ignition date. And according to the requirement of fitting of Landsat spatial resolution (Key and Benson, 2006; Veraverbeke *et al.*, 2010; Henry, 2008 and Arnett *et al.*, 2015), the plots size was of 30 m by 30 m, and were located in fairly homogenous

severity patches of 90 m by 90 m. Homogeneity assessment, which was performed on field by visual analysis of the surroundings, requires certain degree of personal training. Individual coordinates of the plot centers were captured with a hand-held Global Positioning System device (Garmin GPS 12); getting a planimetric accuracy of 5 to 15 meters. Additionally, we took digital photos from the center of each plot to the four cardinal directions in order to record vegetation structure, soil condition and additional information.

Field data consisted of 61 plots for the Madrid fire, and 129 plots for the Guadalajara fire. In the first case, 11 out of 61 were collected in unburned areas outside the limits of the fire perimeter. In the second case, 26 out of 129 plots belonged to the unburned category (figure 1 shows plot locations). Afterwards, we divided field data into two groups: 80% of the plots for training purposes, and the remaining 20% for validation. Selection for training and validation was random within each of the four burn severity levels (unburned, low, moderate, high).

Remotely sensed data

Four Landsat images were selected according to their availability and cloud coverage. For the Madrid fire, we selected a Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) image (path 201, row 32), corresponding to June 10, 2003 (pre-fire), and a Landsat 5 Thematic Mapper (TM) image corresponding to July 6, 2003 (post-fire). For the Guadalajara fire, we selected a Landsat 7 ETM+ image (path 200, row 32), corresponding to June 10, 2005 (pre-fire), and a Landsat 5 TM image corresponding to August 5, 2005 (post-fire). Table 3 shows a summary.

Imagery was downloaded either from the GloVis server (</http://earthexplorer.usgs.gov/>) of the United States Geological Survey (USGS), or from the Earth Science Data Interface (ESDI) server (</http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/>) of the University of Maryland. We selected the Level 1T product (Standard Terrain Correction), which is radiometrically calibrated and ortho-rectified. Afterwards, we further process Landsat data for atmospheric and topographic correction, as described latter in this paper.

Table 3
Summary of remotely sensed data used in this study.

<i>Fire name</i>	<i>Burning dates</i>	<i>Landsat Path/Row</i>	<i>Pre-fire date and sensor</i>	<i>Post-fire date and sensor</i>
Madrid	26-27/June/2003	201/32	10/June/2003 Landsat 7 ETM+	06/July/2003 Landsat 5 TM
Guadalajara	16-19/July/2005	200/32	10/June/2005 Landsat 7 ETM+	05/August/2005 Landsat 5 TM

Workflow

The methodology goes as follows (Figure 2): imagery pre-processing (Section 2.5), spectral index calculation (Section 2.6), spectral separability analysis (Section 2.7), burn severity classification (Section 2.8), and accuracy assessment (Section 2.9).

After pre-processing ETM+ and TM pre- and post-fire images, six spectral indices were calculated. Then, we compared the capability of the different spectral indices to discriminate between different burn severity levels using field data. The best index was used to perform two classification methods: regression models and MLE. We trained both classification methods using 80% of the field plots; and the remaining 20%, to perform an accuracy assessment by means of a matrix error and the Kappa coefficient. As stated before, selection for training and validation was random within each of the four field-calculated burn severity levels (unburned, low, moderate, and high).

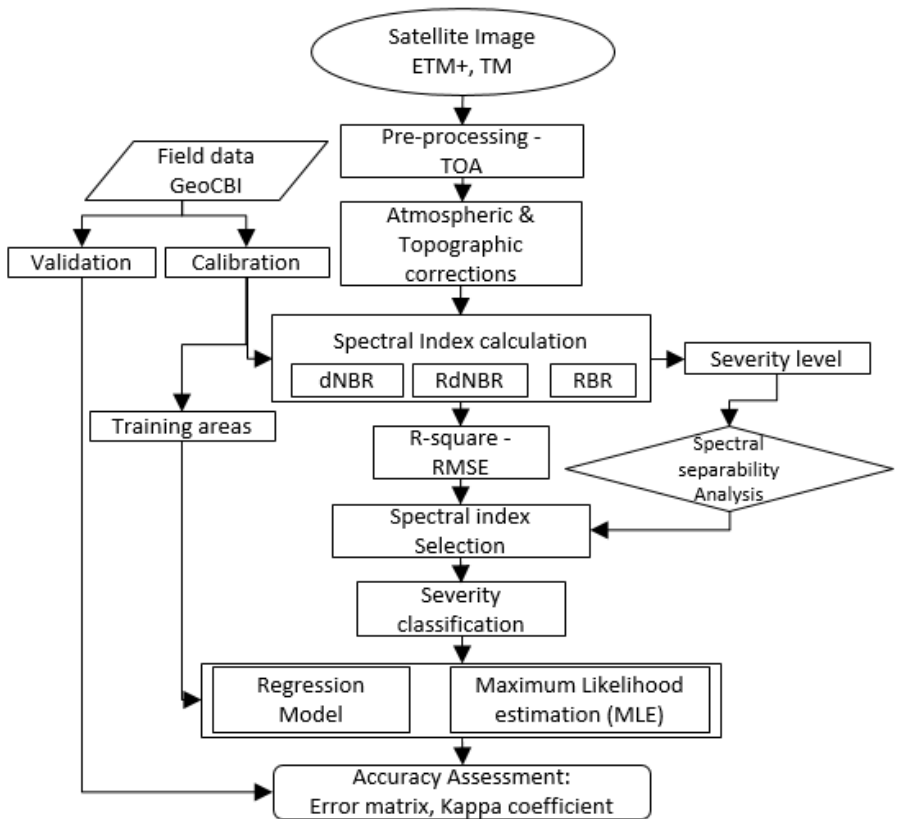


Figure 2. Workflow.

Imagery pre-processing

Pre-processing of remotely sensed data included geometric accuracy check, radiance into reflectance conversion, subsetting of the scene, and topographic and atmospheric correction. Landsat images were Level L1T, which had been radiometrically corrected and ortho-rectified (WGS84 – UTM coordinate system, the study area is located in Zone 30 North) using the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 30 m pixel size Digital Elevation Model (DEM).

Temporal analysis between pre- and post-fire images requires good spatial and spectral consistency between datasets. We evaluated the spatial coherence between scenes using the Root Mean Square Error (RMSE) of the metadata, which involved the use of 213 pairs of coordinates (ground control points). Atmospheric and topographic correction aims at providing good spectral coherence between scenes. Atmospheric correction is a critical step in image processing, especially when the objectives of the study are based on the analysis of spectral indices, the use of different sensors, or in multi-temporal analysis (Chuvieco, 2009; Said *et al.*, 2015 and Hantson and Chuvieco, 2011). This correction consists of the conversion of measured radiances above the atmosphere (Top Of Atmosphere, TOA) to surface reflectances (Bottom Of Atmosphere, BOA).

In this study, we used the ATCOR atmospheric correction model included in the GEOMATICA PCI-2015 software (Richter, 2007). This model calculates reflectance values at ground level based on the input image metadata, eliminating atmospheric effects in satellite images depending on different atmospheric conditions, aerosol types and water vapor. In addition, the spectral response of more or less illuminated areas is homogenized depending on the relief (topographic correction) and the effect of bidirectional reflectivity (BRDF) (Richter, 2007). Surface reflectance was calculated assuming complete solar illumination, that is to say, considering both the direct (E_{dir}) and the diffuse (E_{dif}) components (Flood *et al.*, 2013):

$$\rho_i(x, y) = \frac{\pi(d^2\{c_0(i)+c_1(i)DN_i(x,y)\}-L_{p,i}}{\tau_i\{E_{dir,i}+E_{dif,i}\}} \quad (6)$$

Where, i represents the spectral band, DN is the digital number of a pixel, L_p is the atmospheric radiance, τ is the atmospheric transmittance (from sensor to Earth), d is the relative Earth – Sun distance in astronomical units for the day of image acquisition, and c_0 and c_1 are the sensor calibration coefficients (offset and gain).

Spectral indices calculation

Burn severity assessment clearly benefits from the analysis of spectral indices, particularly if Landsat data is used (Meng *et al.*, 2017; Arnett *et al.*, 2015; Holden *et al.*, 2010 and Veraverbeke *et al.*, 2011). Some of these spectral indices are vegetation

indices; however, most of them were specifically design to detect burn severity, like the NBR index, that integrates the bands (NIR and SWIR) that respond most, but in opposite ways, to burning effects. Besides, many burn severity indices have been derived from the Normalized Burn Ratio. In this study, we calculated six spectral indices using the pre-processed Landsat bands. Some of them, like NDVI and NBR, were single-date. The others were multi-date, that is to say, they involved the use of pre- and post-fire imagery. Table 4 summarizes the spectral indices used in this study.

Table 4
Spectral indices used for burn severity assessment

<i>Spectral index</i>	<i>Equation*</i>	<i>Reference</i>
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Tucker (1979)
Differenced NDVI	$dNDVI = NDVI_{PRE-FIRE} - NDVI_{POST-FIRE}$	Schepers <i>et al.</i> (2014) and Escuin <i>et al.</i> (2008)
Normalized Burn Ratio	$NBR = \frac{\rho_4 - \rho_7}{\rho_4 + \rho_7}$	Key and Benson (2006)
Differenced Normalized Burn Ratio	$dNBR = NBR_{PRE-FIRE} - NBR_{POST-FIRE}$	Key and Benson (2006)
Relative Differenced Normalized Burn Ratio	$RdNBR = \frac{NBR_{PRE-FIRE} - NBR_{POST-FIRE}}{\sqrt{ABS(NBR_{PRE-FIRE} / 1000)}}$	Miller and Thode (2007)
Relativized burn ratio	$RBR = \frac{dNBR}{NBR_{PRE-FIRE} + 1.001}$	Parks <i>et al.</i> (2014)

*NBR is particularly designed for Landsat TM bands 4 (NIR) and 7 (SWIR).

RdNBR and RBR have been used previously as adjusted indices for bare ground and pre-fire vegetation conditions, and they were proved to improve burn severity estimations (Miller and Quayle, 2015; Miller and Thode, 2007 and Parks *et al.*, 2014). We expected them to improve our estimates, through the adjustment of the effect that

has the increased bare ground within the burned areas as a result of the fire-caused canopy loss.

Spectral separability analysis

We calculated a spectral separability index (M), as formulated in Equation (7), in order to evaluate the spectral indices differentiating capability of field-based burn severity levels, as a proxy for assessing the capacity of the spectral indices for discriminating burned severity effects from Landsat imagery. In particular, we used M with two objectives: (i) to both estimate the capability to discriminate between burned and unburned pixels and, (ii) the capability to discriminate among burn severity levels. The spectral separability index, also called normalized distance separability index, has been frequently used to assess the degree of discrimination of both broadband and imaging spectroscopy sensors in fire ecology studies (Meng *et al.*, 2017; Schepers *et al.*, 2014; Harris *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 1999 and Pleniou and Koutsias, 2013). The spectral separability index (M) is calculated as:

$$M = \frac{|\mu_b - \mu_a|}{\sigma_b - \sigma_a} \quad (7)$$

Where, μ_b and μ_a are the mean values of the considered spectral index of burned and unburned classes (or for two particular burn severity classes), and σ_b and σ_a are the corresponding standard deviations. Values of the M index higher than 1 ($M > 1$) indicate good separability (better discrimination), while values lower than 1 ($M < 1$) represent a large degree of histogram overlapping between severity classes. Since the approach of this study was to find the best burn severity estimates, the sensitivity analysis was performed in order to choose the most reliable index in relation to the four field-based severity levels. For the calculation of M, we overlaid the geo-referenced field plots together with the spectral indices. Field-based burn severity data (GeoCBI) was used to assign a severity class to the corresponding pixel value. We used these assignments to calculate the separability index; additionally, we also calculated the coefficient of determination (R^2) between GeoCBI and the six spectral indices.

Burn severity classification

Both, the spectral separability index, and the coefficient of determination between GeoCBI field data and each of the six spectral indices (NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, RdNBR, RBR), led us to the selection of the most appropriate spectral index. The latter would be the one on which the two classification methods (regression analysis and MLE) would be applied.

The first classification method was a regression model. These models evaluate the performance of the satellite-derived spectral indices as continuous metrics of burn

severity, and test their correspondence to GeoCBI using regression equations (Miller and Quayle, 2015). In previous studies, simple linear and various non-linear regression models have been used to predict the relationship between CBI or GeoCBI (field data), and dNBR or RdNBR (satellite data) (Quintano *et al.*, 2017; Miller and Thode, 2007; Meng *et al.*, 2017 and Cansler and McKenzie, 2012). To facilitate the comparison between our results and other studies (Miller and Quayle, 2015; Cansler and McKenzie, 2012 and Stambaugh *et al.*, 2015), we chose to use a linear regression model:

$$Y = a * (Xs) + b \tag{8}$$

Where, Y is the satellite-derived metric being evaluated (spectral index), a is the gain, Xs is the GeoCBI index, and b is the offset value of the model. The goodness of fit of the regression model was evaluated through the coefficient of determination (R^2) (Parks *et al.*, 2014). We estimated two linear regression models, one for each fire (Madrid and Guadalajara), using in both cases 80% of the plots for training and 20% for validation. Next, we evaluated each remotely sensed burn severity classification metrics relative to GeoCBI. Four distinct categories are commonly used when mapping burn severity: unburned ($0.0 \leq \text{GeoCBI} < 0.1$), low ($0.1 \leq \text{GeoCBI} \leq 1.25$), moderate ($1.25 < \text{GeoCBI} \leq 2.25$), and high ($2.25 < \text{GeoCBI} \leq 3.0$) (Key and Benson, 2006 and De Santis and Chuvieco, 2009). We calculated the values of each burn severity metric (spectral index) that corresponded to every GeoCBI threshold value (0.0, 0.1, 1.25, 2.25 and 3.0) to define burn severity metric thresholds for every class, using the linear regression model described in Equation (8).

The second classification method was a Maximum Likelihood Estimation (MLE). Other studies have already used supervised classifiers for mapping severity (Henry, 2008 and Turner *et al.*, 1994). Mitri and Gitas (2006) were able to increase up to 83% overall accuracy of burn severity mapping using object-based supervised classification. In this case, we hypothesized they could had improved the classification accuracy through field data (GeoCBI). Among the conventional methods of classifying multispectral imagery, the MLE is the most widely used algorithm for pixel-based classification. MLE has shown to give the best results for classification of remotely sensed natural resource data among the parametric classifying algorithms (Yang *et al.*, 2006). As is well known, the MLE allocates a pixel to the class with which it has the highest probability of correspondence (Ahmad and Quegan, 2013), where the likelihood $L_i(x)$ that a pixel x is a member of class (i) is given by:

$$L_i(x) = (2\pi)^{-n/2} * |V_i|^{-1/2} e^{-y/2} \tag{9}$$

Where, V_i is the covariance matrix of class i , n is the number of spectral bands, and y is the Mahalanobis distance. The rescaling of $L_i(x)$ between 0 and 1 yields the

MLE a posteriori probability $P_i(x)$ (Dean and Smith, 2003). Field training sites were chosen based upon previous knowledge of the severity class each plot belonged to. Although it is possible to generate more classes during the classification process, the four severity classes were kept for training purposes due to the spectral disparities between them (e.g. moderate and high). Besides, it was also important to distinguish between burned from unburned areas, so field plots outside of the fire perimeter were included in the training procedure.

Fire perimeters were constructed based on our own burn severity maps, and assessed using official data from the Fire Management Office in Madrid (CAM, 2005), as well as the results of De Santis and Chuvieco (De Santis and Chuvieco 2009) for the Guadalajara fire. In particular, fire perimeters were created based on the burn severity maps developed from pre-fire NBR and dNBR (Kolden and Weisberg, 2007 and Finco *et al.*, 2012).

Accuracy assesment

We assessed the regression models by using the coefficient of determination, and discretized-into-burn-severity-classes regression results were evaluated using confusion matrices; furthermore, we also evaluated the MLE using the latter technique. Confusion matrices produce several metrics: overall accuracy, producers and users accuracy, and the Kappa coefficient. Producer's accuracy (omission error) is an evaluation of when a field plot is not assigned to the correct category. User's accuracy (commission error) is an evaluation of when a field plot is assigned to the wrong category. The Kappa coefficient is a measure of the difference between the actual agreement between reference data and classified data, and the chance agreement between the reference data and randomly classified data. Confusion matrices allowed the comparison between classification methods (regression models and MLE), and between fire sites (Madrid and Guadalajara).

We calculated overall accuracy as the percentage of field plots rightly classified into each burn severity class relative to its GeoCBI value, using the validation group of field plots (20% in each case). The validation assessment was conducted for each fire (Madrid and Guadalajara) individually. Our evaluation of the best classification method involves: (i) the overall classification accuracy of the field data, and (ii) the classification accuracy of each burn severity level. In this process, we used the GeoCBI thresholds that are most common, based on ecological conditions determined by the CBI and GeoCBI scale, in order to allow a more consistent interpretation of classes across multiple fires. These GeoCBI thresholds also facilitate comparison with previous studies (Miller and Thode, 2007 and Cansler and McKenzie, 2012).

Results

GeoCBI field data

Results from fieldwork revealed (in both cases Madrid and Guadalajara) that most of the plots belonged to the high severity class. In the case of Madrid, 56% of the field plots belonged to the high severity class, 42% to the moderate, and just 2% to the low severity class. The average GeoCBI for the Madrid fire was 2.67, thus classifying this fire into the high severity class. In the case of Guadalajara, 90.3% of the field plots belonged to the high severity class, 7.7% to the moderate, and just 2% to the low severity class. The average GeoCBI for the Guadalajara fire was 2.85, thus this fire was also assigned to the high severity class. Figure 3 shows the distribution of the GeoCBI field results.

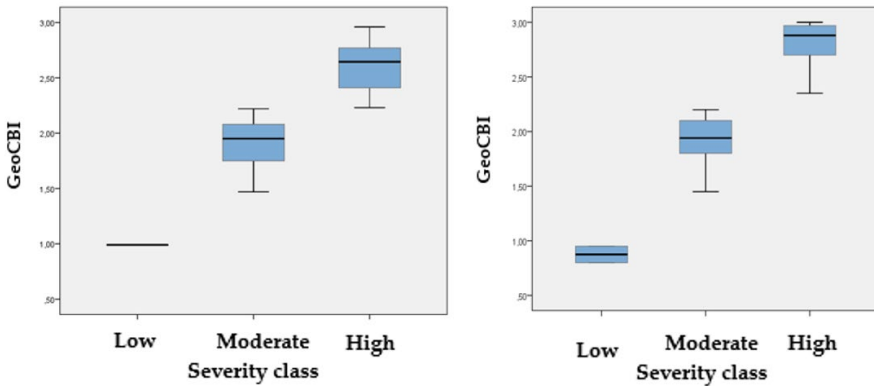


Figure 3. GeoCBI distribution: (a) Boxplots for Madrid fire, and (b) Boxplots for Guadalajara fire. Boxes represent the inter-quartile range, whiskers extend to the 5th and 95th percentiles, horizontal lines represent the median of field plots.

Relationship between GeoCBI and the spectral indices

GeoCBI field data and the six spectral indices showed a relatively high degree of correlation, especially in the Madrid fire. Figure 4 shows some examples of GeoCBI field data and the corresponding RBR spectral values and locations. Table 5 shows the coefficient of determination (R^2), the averaged by spectral index coefficient of determination, the adjusted R^2 and the Root Mean Squared Error (RMSE). Although differences between spectral indices were not very large, RdNBR and RBR performed slightly better than the others did. The best R^2 -adjusted values were for the RBR and RdNBR indices, with values of 0.827 and 0.822, respectively. These results indicate better performance of RBR and RdNBR, higher correspondence between

GeoCBI and these two spectral indices, and better capacity for explaining the variance in burn severity when compared to the rest of spectral indices.

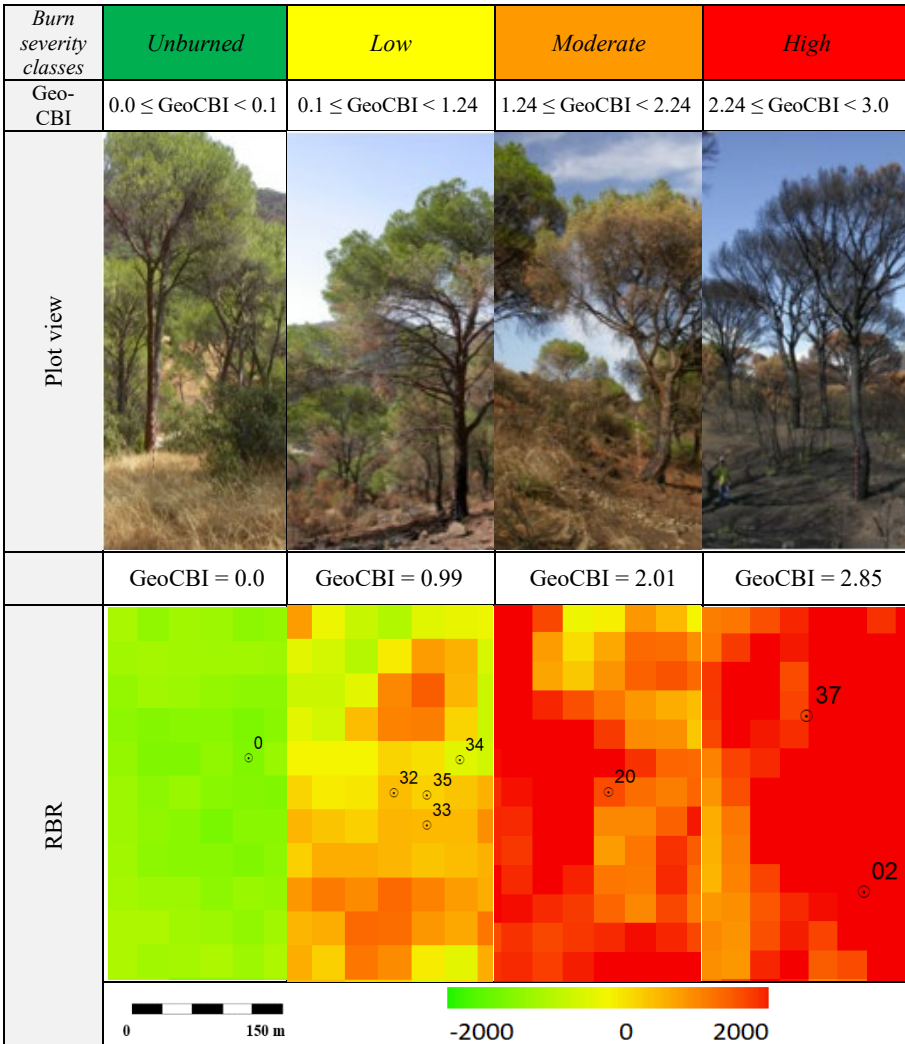


Figure 4. GeoCBI field plots (Madrid fire): burn severity classes, GeoCBI intervals, plot views, GeoCBI values for those plots shown on the pictures, and RBR index.

Table 5
Variance explained and overall correlation between GeoCBI and the six spectral indices

<i>Spectral Index</i>	<i>Fire name</i>	R^2	R^2 average	R^2 adjusted	<i>RMSE</i>
NDVI	Guadalajara	0.583	0.699	0.580	0.730
	Madrid	0.814		0.811	0.423
NBR	Guadalajara	0.596	0.697	0.593	0.719
	Madrid	0.798		0.794	0.441
dNDVI	Guadalajara	0.615	0.694	0.612	0.702
	Madrid	0.772		0.768	0.469
dNBR	Guadalajara	0.609	0.711	0.606	0.708
	Madrid	0.812		0.809	0.408
RdNBR	Guadalajara	0.627	0.725	0.624	0.691
	Madrid	0.822		0.820	0.413
RBR	Guadalajara	0.626	0.727	0.623	0.692
	Madrid	0.827		0.824	0.408

Figure 5 shows the correspondence between field data and satellite-derived information. These plots also show the distribution of GeoCBI field scores. For the Madrid fire GeoCBI severity values were more evenly distributed than for the Guadalajara fire. In the latter, most of the field-measured severity scores were of the high severity classes since it was a catastrophic fire. However, satellite response seemed to be not as fine as we would had expected, and showed a certain degree of signal saturation. According to Van Wagendonk *et al.* (2004), dNBR saturates when CBI scores are larger than 2.3, as it could had happen in our case. The way field and satellite data relate to each other in the Guadalajara fire made that this fire was more difficult to be modelled than the Madrid fire.

Spectral separability

Figure 6 shows the spectral signatures that corresponded to four field locations in the Madrid (a) and Guadalajara (b) fire, one for each burn severity class (unburned, low, moderate and high). Spectral data came from Landsat TM images (post-fire data). Spectral values were extracted from the pixel where the field plots were located. The spectral signatures of burned areas were compared between the two fires, in order to obtain a better understanding of their spectral behavior and potential discriminatory ability. Bands in the NIR (B4) and SWIR (B7) are highlighted in the graph since they

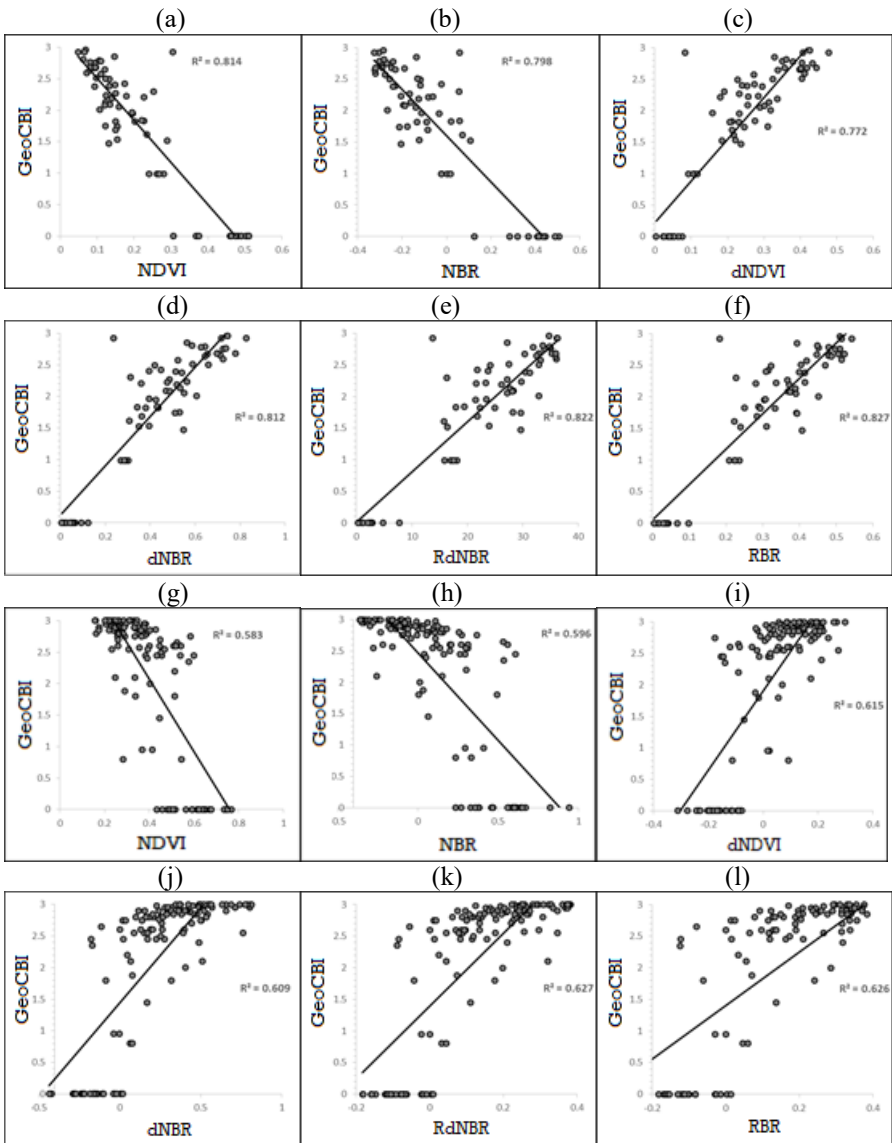


Figure 5. Scatter plots between observed burn severity GeoCBI values, and spectral indices. For the Madrid fire: (a) NDVI, (b) NBR, (c) dNDVI, (d) dNBR, (e) RdNBR, and (f) RBR, and for the Guadalajara fire: (g) NDVI, (h) NBR, (i) dNDVI, (j) dNBR, (k) RdNBR, and (l) RBR.

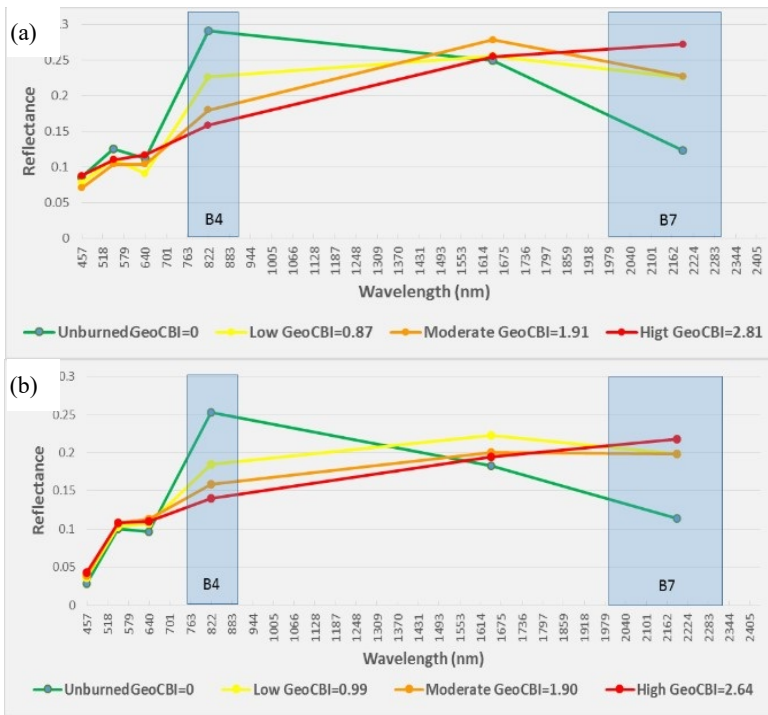


Figura 6. Spectral signature of the four burn severity classes according to Landsat TM channels: (a) Madrid fire and (b) Guadalajara fire. Spectral signature refers to four particular field plots, one per severity class.

Table 6
Spectral separability index (M) for each spectral index and fire site

Spectral index	Fire name	Separability index (M)	M average
NDVI	Guadalajara	0.707	1.338
	Madrid	1.968	
NBR	Guadalajara	0.922	1.386
	Madrid	1.850	
dNDVI	Guadalajara	0.871	1.614
	Madrid	2.356	
dNBR	Guadalajara	1.040	1.815
	Madrid	2.590	
RdNBR	Guadalajara	1.082	1.800
	Madrid	2.518	
RBR	Guadalajara	1.068	2.000
	Madrid	2.931	

showed the highest changes in spectral response, what is the reason why most of the burn severity spectral indices uses them. The discrimination capability of the NIR band is much higher than that of the visible channels, despite the low spectral distance between bare land and vegetation in the NIR, and the low spectral distance between bare land and burned areas in the SWIR. Among these, the NIR band (B4) showed the highest discrimination between severity levels, and between burned and unburned areas, followed by band 7 (SWIR), band 5 (SWIR) and band 3 (red).

Spectral index selection

Spectral index selection was based on the results from the two previous sections, that is to say, the relationship between field and satellite data, and the spectral separability analysis. In general, we found a high correlation for all the spectral indices in both study areas. In the case of the Madrid fire, the RBR showed the highest correlation with GeoCBI ($R^2= 0.827$) and the largest separability score ($M= 2.93$). In the case of Guadalajara, the best fit of R^2 was presented for the RdNBR and the RBR indices ($R^2= 0.627$ and 0.626 , respectively), being also the two indices that showed the greatest spectral separability ($M= 1.082$ and 1.068 , respectively). According to these results, RBR was selected for subsequent burn severity mapping as the best index for discrimination of severity.

Burn severity classifications

The RBR index, together with 80% of the field data, was used to carry out both classification burn severity methods proposed in this research: linear regression and MLE. Figure 7 shows the resulting maps along with the post-fire Landsat images used in this study. Although the detailed accuracy assessment is presented in the next section, results reached so far showed a relatively strong correlation based on the regression parameters of the RBR: in the Madrid fire, with a significant Pearson correlation of 0.897 and a RMSE of 0.440, and in the Guadalajara fire, with a Pearson correlation of 0.759 and a RMSE of 0.734. We also found that linear regression models tended to overestimate the unburned class, as well as to increment the number of pixels in the low and moderate burn severity classes versus the high severity ones.

The spatial heterogeneity within the burned area is clearly visible in both fires. All the burn severity maps (Figure 7) showed different levels of burn severity within the two study areas, and some small unburned or low-severity patches bordered by large moderate to high-severity areas. The spatial heterogeneity was higher in the Guadalajara fire. This fact might be due to a couple of reasons. Firstly, it was a high intensity and high fire and burn severity fire as one can conclude from the fieldwork (GeoCBI scores) and previous research (De Santis and Chuvieco, 2007, 2009). Secondly, the fire lasted several days and alternated intensive periods of burning (during the hot and dry daytimes) with less intensive burning phases (during nighttime).

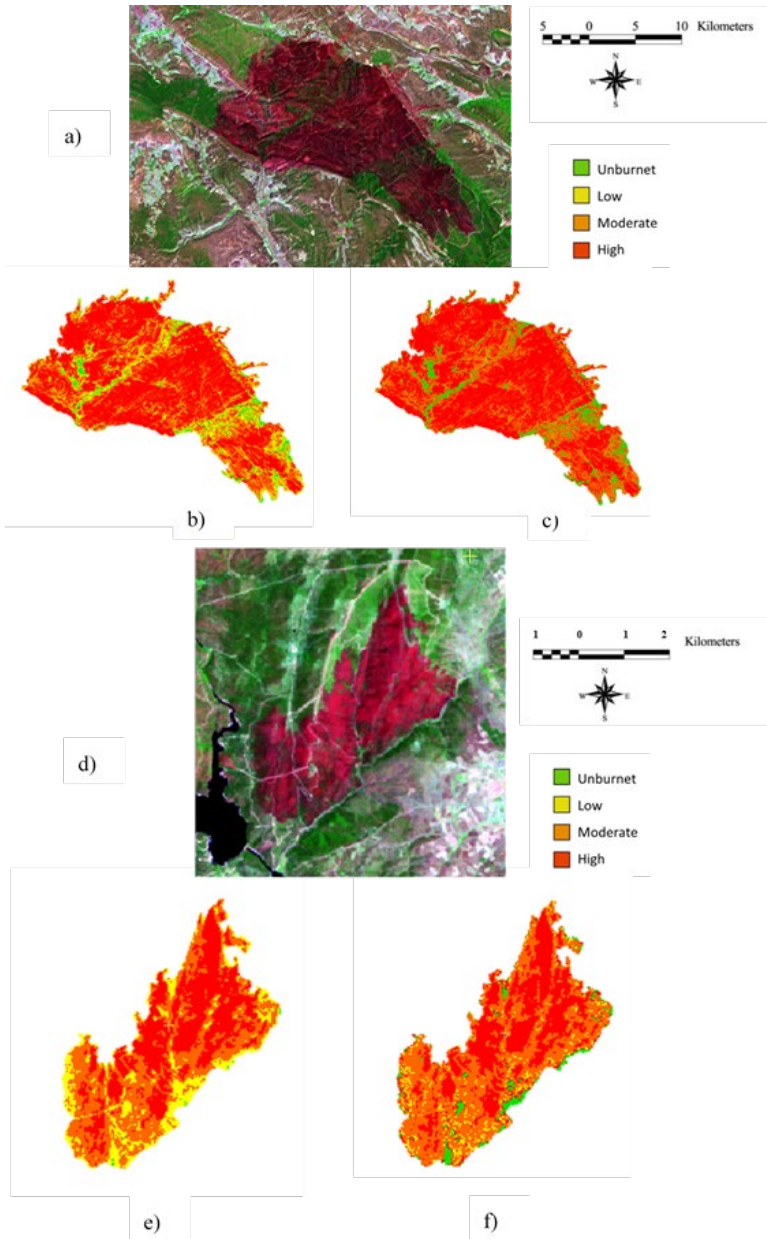


Figure 7. Burn severity mapping: a) Landsat TM (RGB 741), Guadalajara fire; b) Burn severity map by linear regression, Guadalajara fire; c) Burn severity map by MLE, Guadalajara fire; d) Landsat TM (RGB 741), Madrid fire; e) Burn severity map by linear regression, Madrid fire; f) Burn severity map by MLE, Madrid fire.

Accuracy Assesment

Overall classification accuracies for individual fires ranged from 58% (MLE, Guadalajara fire) to 92% (MLE, Madrid fire) (Table 7). When averaged among fires, the MLE classification method retrieved higher overall accuracy (75%) than the regression model (72.5%). Considering the Kappa coefficient, MLE classification method performed better than the regression models. Besides, when analyzing classification accuracies per class, we found that the accuracy of the classification in the lower and middle classes improved with the use of the MLE, in relation to the regression model technique. Which means that classification accuracy in the moderate and high severity classes decreased when the linear regression model was used, as opposed to the MLE model (Table 7). Classification accuracies among severity classes were significantly different, but indicated a general agreement between burn severity classifications and validation field plots. The increased classification accuracy in the low and moderate burn severity classes reflects differences between classification models, an effect due to the probabilistic classification of the MLE model in pixels where there is confusion between thresholds (Figure 8).

Table 7
Overall classification accuracy for classification methods using individual burn severity classes on RBR

Classification method	Fire name	Overall accuracy	Kappa	Kappa average	Classification accuracy (%)				
					Unburned	Low	Moderate	High	
Regression model	Guadalajara	60	0.38	0.58	User's	100	14	33	81
					Producer's	100	50	50	53
	Madrid				User's	00.0	33	100	100
					Producer's	00.0	100	100	100
MLE	Guadalajara	58	0.41	0.65	User's	67	00.0	20	100
					Producer's	100	00.0	100	41
	Madrid				User's	100	100	83	100
					Producer's	100	100	100	80

In order to understand the performance of the models in more detail, we extracted frequency distributions of RBR-based severity classes derived from the regression models for the Guadalajara and the Madrid fire, as shown in Figure 8. The histograms show that burned and unburned pixels were well separated and relatively easy to be discriminated, especially in the Madrid fire. However, the frequency distribution of

the burn severity classes (low, moderate, high) was superposed between levels, e.g. mean RBR value of certain class (red dash line in Figure 8) was within the range of an upper class, and vice versa.

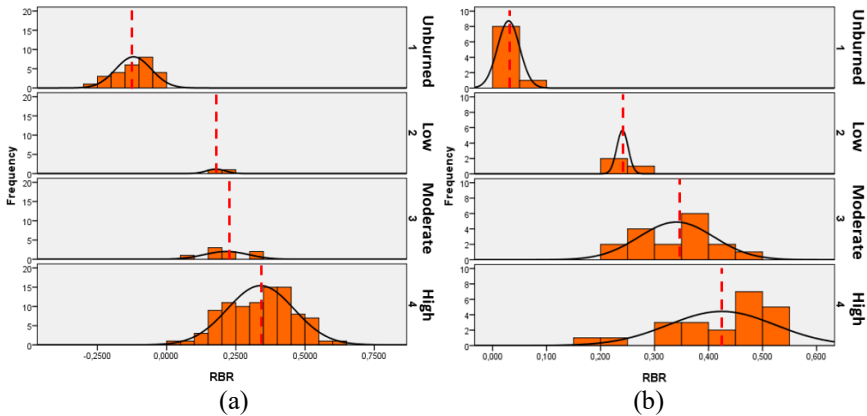


Figure 8. Frequency distributions of burn severity levels extracted pixels of RBR (regression models): (a) Guadalajara fire, and (b) Madrid fire. The vertical dash lines show a mean RBR value per class.

Discussion

Burn severity mapping is critical for the understanding of post-fire landscape changes and ecosystem resilience (San-Miguel *et al.*, 2013; Ariza, 2017; Arnett *et al.*, 2015 and Turner *et al.*, 1994), a situation that has led to an increase of studies that use moderate to high spatial resolution satellite sensors (Key and Benson, 2006; De Santis and Chuvieco, 2009 and Veraverbeke, 2010). The increased availability of better spatial resolution imagery (e.g. Landsat or Sentinel series) provides an important opportunity not only for mapping burn severity, but also for studying post-fire regeneration and successional effects (Montealegre *et al.*, 2014; Chuvieco, 2009; Key and Benson, 2006; De Santis and Chuvieco, 2009 and Finco *et al.*, 2012). In this study, we explore the correspondence between satellite data and field-based measures of burn severity with the objective of choosing the index that performs best. Additionally, we use field and satellite data to investigate the differences in the use of supervised classification through MLE versus regression models for burn severity mapping.

Overall, burn severity mapping at Landsat TM and ETM+ scales was consistent with GeoCBI field measurements. The good performance of the weighted version of the CBI, the GeoCBI, may be due to the fact that it measures field parameters (FCOV, LAI, new sprouts) that are more closely related to the post-fire reflectance of the plot (De Santis and Chuvieco, 2009; Meng *et al.*, 2017 and Cansler and McKenzie, 2012).

Our results are comparable to those other studies with similar characteristics in different territories —Canada, USA, Spain— (Cocke *et al.*, 2005; Holden *et al.*, 2005; Miller and Quayle, 2015; De Santis and Chuvieco, 2009 and Cansler and McKenzie, 2012). Additionally, the correspondence between the newer indices (RBR, RdNBR) and GeoCBI field-based measures of burn severity indicates an improvement over more classical burn and vegetation indices (dNBR, NBR, dNDVI, NDVI), as it was found in previous research (Parks *et al.*, 2014); none the less, we did find important differences between the two fires of the study.

The correspondence between satellite and field data was stronger in the Madrid fire. GeoCBI measures depend on several factors, such as the ecosystem type, the type of sampling, the number of samples and the severity intervals. Concerning the two first factors (ecosystem and sampling types) there were not great differences between the two wildfires. The number of samples per unit area was much larger in the Madrid fire, a simple fact that led to count on more significant field information; besides, the Guadalajara fire was much bigger and more severe. However, it seems that the main difficulty was due to the severity intervals. The weaker correspondence between satellite and field data in the Guadalajara fire was because 90% of the field plots belonged to the high severity class, according to the severity intervals previously defined. The high severity class in this study area was scattered, leading to lower R^2 and separability values. This issue could have been solved using more adequate severity intervals, at the expense of making this research less comparable.

The findings of our investigation can be explained, at least partially, by the spectral properties of the severity ratings of the burn according to the severity classes. Previous studies of Cansler and McKenzie (2012) determined how robust were some spectral indices when applied to new regions. Additionally, our study identified the spectral index that performs the best in severity discrimination, the RBR, and the sensitivity of spectral reflectance values with respect to different levels of burn severity. After assessing the separability of six spectral indices for the discrimination of burning effects in Mediterranean ecosystems, we found that the spectral indices using NIR and SWIR bands (NBR, dNBR, RdNBR, RBR) performed better than those using the NIR bands (NDVI, dNDVI), as described previously (Miller and Quayle, 2015; Miller and Thode, 2007 and Meng *et al.*, 2017). This is coherent with the higher capability of the SWIR (TM B7) in comparison with the red band (TM B3) for the discrimination between severity levels, and between burned and unburned areas (Figure 6).

In their study on the evaluation of spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulated data, Veraverbeke *et al.* (2011) demonstrated that the highest sensitivity of the long SWIR region (1 900-2 500 nm) was between the 2 310 and 2 360 nm interval. In our case, we observed that the sensitivity in the VIS region (450-690 nm) was very poor, while the SWIR

region (2 080-2 350 nm) showed moderate discriminatory power. However, the highest spectral separability between severity classes was observed in the spectral region of NIR (760-900 nm). This finding is consistent with the studies by Schepers *et al.* (2014) and Arnett *et al.* (2015), who used high resolution imagery for assessing burn effects in heathlands of Europe, and in mixed forests of western Canada, respectively.

In general terms, the spectral indices that were designed to account for the reflectance from the canopy affected by burn severity and the pre-fire conditions (RBR, RdNBR, dNBR), tended to show higher separability (Table 7), as preceding studies have shown (Miller and Quayle, 2015; Miller and Thode, 2007 and Meng *et al.*, 2017). However, like in the Parks *et al.* (2014) study, the RBR was the index that best corresponded to field-based burn severity measurements, and had the highest classification accuracy compared to dNBR and RdNBR when discriminating different levels of severity. The RBR index, followed by RdNBR, offered better results than dNBR due to their adjustment to bare ground and pre-fire vegetation conditions (Miller and Quayle, 2015; Miller and Thode, 2007 and Parks *et al.*, 2014). These differences, however, were especially noticeable in the Madrid fire.

Based on the error matrices parameters, the approach of the supervised classification by MLE, with an overall average accuracy of 76%, slightly improves the linear regression models approach, with an overall accuracy of 75%. The gain is low when we compared averaged values. However, it is noticeable in the Madrid fire (in the overall accuracy and the Kappa coefficient), and in the moderate and high classes of the Guadalajara fire. Therefore, our evaluation of the resulting burn severity maps indicate that the MLE approach can be used for forest burn severity mapping at the spatial scales of Landsat TM and ETM+ data with reasonable accuracy (Table 7), especially for forest fires similar to the Madrid one. The weaker results in Guadalajara could be explained by the severe characteristics of this wildfire and the massive concentration of scattered data in a single severity class. User and producer accuracies for low and moderate severity categories were poor for two reasons (Table 7): firstly, low and moderate classes had much less plots than the other categories, especially in the Guadalajara fire, it is important to consider the number of plots evaluated per category, as well as the accuracy of the registration of imagery (Miller and Quayle, 2015). Secondly, the location of the plots could not have been optimal in relation to the study area; additionally, another problem arises from the fact that plots do not align perfectly with the 30 m satellite pixel. The way fire behaves from surface to crown within 30 m according to Miller & Quayle (2015) and Safford *et al.* (2012), is also a factor, since fire effects can vary considerably within a pixel, resulting in less precise evaluation of the burn severity in pixels adjacent to the limits of the fire perimeter, and the severity classes.

Finally, Figure 7 indicates that the heterogeneity of burn severity patterns was high in the two fires. Future research could determine the relationship between the

degrees of severity and the changes induced by fire in the landscape, in order to provide information to post-fire management tasks and restoration programs, but also to provide information on changes in plant function associated with fire impacts (Smith *et al.*, 2016 and Morgan *et al.*, 2014).

Conclusions

GeoCBI field data and the Landsat-based spectral indices were used in this study to generate burn severity maps in Mediterranean ecosystems using two classification algorithms: linear regression models and supervised classification by maximum likelihood estimation (MLE). GeoCBI field data adjust moderately to the spectral indices, being very dependent on the ecosystem type, the type of sampling, the number of samples and the severity intervals. Among the analyzed six spectral indices, the Relativized Burn Ratio (RBR) and the Relative Differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) showed the best correspondence between satellite and field-based measures of burn severity. The RBR index was preferred in this study because it showed better spectral separability and consistency across regions. The supervised classification by MLE method, which used GeoCBI field data and the RBR index, improved the performance of the classical regression models for burn severity mapping. Differences between study areas might be due to the severity characteristics of the two wildfires. Since the Guadalajara fire was more severe than the Madrid fire, spectral indices tended to saturate more, a fact that affected the capacity of the spectral indices and the algorithms to model burn severity in a reliable manner.

Bibliography

- Ahmad, A. and Quegan, S. (2013). "Analysis of Maximum Likelihood classification technique on Landsat 5 TM satellite data of tropical land covers", Proceedings - 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2012, (November), pp. 280-285. <<https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2012.6487156>>.
- Amraoui, M.; Liberato, M.L.R.; Calado, T.J.; Dacamara, C.C.; Coelho, L.P.; Trigo, R.M. and Gouveia, C.M. (2013). "Fire activity over Mediterranean Europe based on information from Meteosat-8", *For. Ecol. Manage.*, no. 294, pp. 62-75. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.08.032.
- Ariza, A. (2017). *Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección*, Alcalá de Henares.
- Arnett, J.T.T.R.; Coops, N.C.; Daniels, L.D. and Falls, R.W. (2015). "Detecting forest damage after a low-severity fire using remote sensing at multiple scales", *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, no. 35, pp. 239-246. DOI: 10.1016/j.jag.2014.09.013.
- CAM (2005). *Replacación de la superficie afectada por el incendio del 26 de junio de 2003 en los Montes del C.U.P., no. 48, no. 50 y no. 54 de la Comarca X-San Martín de Valdeiglesias*, Madrid, 2005.

- Cansler, C.A. and McKenzie, D. (2012). "How robust are burn severity indices when applied in a new region? Evaluation of alternate field-based and remote-sensing methods", *Remote Sens.*, no. 4, pp. 456-483. DOI: 10.3390/rs4020456.
- Chafer, C.J.; Noonan, M. and Macnaught, E. (2004). "The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 13, pp. 227-240. DOI: 10.1071/WF03041.
- Chuvieco, E. (2009). *Earth observation of wildland fires in mediterranean ecosystems*.
- Cocke, A.E. and Fulé, P.Z. (2005). "Crouse, J. E. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 14, p. 189. DOI: 10.1071/WF04010.
- Collins, R.D.; de Neufville, R.; Claro, J.; Oliveira, T. and Pacheco, A.P. (2013). "Forest fire management to avoid unintended consequences: A case study of Portugal using system dynamics", *J. Environ. Manage*, no. 130, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.033.
- De Santis, A. and Chuvieco, E. (2007). "Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models", *Remote Sens. Environ*, no. 108, pp. 422-435. DOI:10.1016/J.RSE.2006.11.022.
- (2009). "GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data", *Remote Sens. Environ*", no. 113, pp. 554-562. DOI: 10.1016/j.rse.2008.10.011.
- Dean, A.M. and Smith, G.M. (2003). "An evaluation of per-parcel land cover mapping using maximum likelihood class probabilities", *Int. J. Remote Sens.*, no. 24, pp. 2905-2920. DOI: 10.1080/01431160210155910.
- Eleazar, M.J.; Enriquez, E.; Gallar, J.J.; Jemes, V.; López, M.; Mateo, M.L.; Muñoz, A. and Parra, P.J. (2013). *Los incendios forestales en España. Decenio 2001-2010*, Madrid.
- Escuin, S.; Navarro, R. and Fernández, P. (2008). "Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images", *Int. J. Remote Sens.*, no. 29, pp. 1053-1073. DOI: 10.1080/01431160701281072.
- Finco, M.; Quayle, B.; Zhang, Y.; Lecker, J.; Megown, K.A. and Brewer, C.K. (2012). "Monitoring Trends and Burn Severity (MTBS): Monitoring wildfire activity for the past quarter century using LANDSAT data. Mov. from Status to Trends For", *Invent. Anal. Symp.*, pp. 222-228.
- Flood, N., Danaher, T., Gill, T. and Gillingham, S. (2013). "An operational scheme for deriving standardised surface reflectance from landsat TM/ETM+ and SPOT HRG imagery for eastern Australia", *Remote Sensing*, 5(1), pp. 83-109. <<https://doi.org/10.3390/rs5010083>>.
- Hantson, S. and Chuvieco, E. (2011). "Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery", *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, no. 13, pp. 691-700. DOI: 10.1016/j.jag.2011.05.001.

- Harris, S.; Veraverbeke, S. and Hook, S. (2011). "Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using modis/aster (MASTER) airborne simulator data", *Remote Sens.*, no. 3, pp. 02403-2419. DOI: 10.3390/rs3112403.
- Henry, M.C. (2008). "Comparison of Single and Multi-date Landsat Data for Mapping Wildfire Scars in Ocala National Forest, Florida. Photogramm", *Eng. Remote Sensing*, no. 74, pp. 881-891.
- Holden, Z.A.; Morgan, P.; Smith, A.M.S. and Vierling, L. (2010). "Beyond Landsat: A comparison of four satellite sensors for detecting burn severity in ponderosa pine forests of the Gila Wilderness, NM, USA", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 19, pp. 449-458. DOI: 10.1071/WF07106.
- Holden, Z.A.; Smith, A.M.S.; Morgan, P.; Rollins, M.G. and Gessler, P.E. (2005). "Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data", *Int. J. Remote Sens.*, no. 26, pp. 4801-4808. DOI: 10.1080/01431160500239008.
- Hoscilo, A.; Tansey, K.J. and Page, S.E. (2013). "Post-fire vegetation response as a proxy to quantify the magnitude of burn severity in tropical peatland", *Int. J. Remote Sens.*, no. 34, pp. 412-433. DOI: 10.1080/01431161.2012.709328.
- Ichoku, C.; Giglio, L.; Wooster, M.J. and Remer, L.A. (2008). "Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy", *Remote Sens. Environ.*, no. 112, pp. 2950-2962. DOI: 10.1016/j.rse.2008.02.009.
- Keeley, J.E. (2009). "Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 18, pp. 116-126. DOI: 10.1071/WF07049.
- Kern, A.N.; Addison, P.; Oommen, T.; Salazar, S.E. and Coffman, R.A. (2017). "Machine Learning Based Predictive Modeling of Debris Flow Probability Following Wildfire in the Intermountain Western United States", *Math. Geosci.*, pp. 1-19.
- Key, C.H. and Benson, N.C. (2006). *Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods*.
- Key, C.H. and Benson, N.C. (2002). "Post-fire assessment by remote sensing on National Park Service Lands", in J.L. Coffelt and R.K. Livingston, *Los Alamos*, NM October 31-November 3, 2000. USGS Open-File Report 02-11:56.
- Knipling, E.B. (1970). "Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation", *Remote Sens. Environ.*, no. 1, pp. 155-159. DOI: 10.1016/S0034-4257(70)80021-9.
- Kolden, C.A. and Weisberg, P.J. (2007). "Assessing Accuracy of Manually-mapped Wildfire Perimeters In Topographically Dissected Areas", *Fire Ecol.*, no. 3, pp. 22-31. DOI: 10.4996/fireecology.0301022.
- Lentile, L.B.; Holden, Z.A.; Smith, A. M.S.; Falkowski, M.J.; Hudak, A.T.; Morgan, P.; Lewis, S.A.; Gessler, P.E. and Benson, N.C. (2006). "Remote sensing

- techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects”, *Int. J. Wildl. Fire*, no. 15, pp. 319-345.
- Meng, R.; Wu, J.; Schwager, K.L.; Zhao, F.; Dennison, P.E.; Cook, B.D.; Brewster, K.; Green, T.M. and Serbin, S.P. (2017). “Using high spatial resolution satellite imagery to map forest burn severity across spatial scales in a Pine Barrens ecosystem”, *Remote Sens. Environ.*, no. 191, pp. 95-109. DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.016.
- Miller, J.D. and Quayle, B. (2015). “Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics”, *Fire Ecol.*, no. 11, pp. 12-30. DOI: 10.4996/fireecology.1102012.
- Miller, J.D. and Thode, A.E. (2007). “Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)”, *Remote Sens. Environ.*, no. 109, pp. 66-80. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.006.
- Mitri, G.H. and Gitas, I.Z. (2006). “Fire type mapping using object-based classification of Ikonos imagery”, *Int. J. Wildl. Fire*, no. 15, pp. 457-462, DOI: 10.1071/WF05085.
- Molina, J.L.; Bromley, J.; García-Aróstegui, J.L.; Sullivan, C. and Benavente, J. (2010). “Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using Object-Oriented Bayesian Networks”, *Environ. Model. Softw.*, no. 25, pp. 383-397. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.10.007.
- Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; Tanase, M.A. and De la Riva, J. (2014). “Forest fire severity assessment using ALS data in a mediterranean environment”, *Remote Sens.*, no. 6, pp. 4240-4265. DOI:10.3390/rs6054240.
- Morgan, P.; Keane, R.E.; Dillon, G.K.; Jain, T.B.; Hudak, A.T.; Karau, E.C.; Sikkink, P.G.; Holden, Z.A. and Strand, E.K. (2014). “Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling”, *Int. J. Wildl. Fire*, no. 23, pp. 1045-1060. DOI: 10.1071/WF13058.
- Parker, B.M., Lewis, T. and Srivastava, S.K. (2015). “Estimation and evaluation of multi-decadal fire severity patterns using Landsat sensors”, *Remote Sensing of Environment*, no. 170, pp. 340-349. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.014>>.
- Parks, S.A.; Dillon, G.K. and Miller, C. (2014). “A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio”, *Remote Sens.*, no. 6, pp. 1827-1844. DOI: 10.3390/rs6031827.
- Parsons, A.; Robichaud, P.R.; Lewis, S.A.; Napper, C.; Clark, J.T. and Jain, T.B. (2010). *Field guide for mapping post-fire soil burn severity*, Water, no. 49.
- Pausas, J.G.; Llovet, J.; Anselm, R. and Vallejo, R. (2008). “Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review Vegetation changes Shrublands dominated by resprouting species”, *Int. J. Wildl. Fire*, no. 17, pp. 713-723. DOI: 10.1071/WF07151.
- Pereira, J.M.; Sa, A.C.L.; Sousa, A.M.O.; Silva, J.M.N.; Santos, T.N. and Carreiras, J.M.B. (1999). “Spectral characterisation and discrimination of burnt areas”,

- Remote Sens. Large Wildfires*, pp. 123-138. DOI: 10.1007/978-3-642-60164-4_7.
- Pleniou, M. and Koutsias, N. (2013). "Sensitivity of spectral reflectance values to different burn and vegetation ratios: A multi-scale approach applied in a fire affected area", *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, no. 79, pp. 199-210. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.02.016.
- Quintano, C.; Fernandez-Manso, A. and Roberts, D.A. (2017). "Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and Land Surface Temperature", *Remote Sens. Environ.*, no. 190, pp. 83-95. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.009.
- Richter, R. (2007). "Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR - 2/3 User Guide). ATCOR-2/3 User Guid. Version 6.3, pp. 1-71. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Roy, D.P.; Boschetti, L. and Trigg, S.N. (2006). "Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, no. 3, pp. 112-116. DOI: 10.1109/LGRS.2005.858485.
- Safford, H.D.; Stevens, J.T.; Merriam, K.; Meyer, M.D. and Latimer, A.M. (2012). "Fuel treatment effectiveness in California yellow pine and mixed conifer forests", *For. Ecol. Manage.*, no. 274, pp. 17-28. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.013.
- Said, Y.A.; Petropoulos, G.P. and Srivastava, P.K. (2015). "Assessing the influence of atmospheric and topographic correction and inclusion of SWIR bands in burned scars detection from high-resolution EO imagery: a case study using ASTER", *Nat. Hazards*, no. 78, pp. 1609-1628. DOI: 10.1007/s11069-015-1792-9.
- San-Miguel-Ayanz, J.; Moreno, J.M. and Camia, A. (2013). "Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives", *For. Ecol. Manage.*, no. 294, pp. 11-22. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.050.
- Schepers, L.; Haest, B.; Veraverbeke, S.; Spanhove, T.; Borre, J. Vanden and Goossens, R. (2014). "Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX)", *Remote Sens.*, no. 6, pp. 1803-1826. DOI: 10.3390/rs6031803.
- Smith, A.M.S.; Sparks, A.M.; Kolden, C.A.; Abatzoglou, J.T.; Talhelm, A.F.; Johnson, D.M.; Boschetti, L.; Lutz, J.A.; Apostol, K.G.; Yedinak, K.M.; Tinkham, W.T. and Kremens, R.J. (2016). "Towards a new paradigm in fire severity research using dose-response experiments", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 25, pp. 158-166. DOI: 10.1071/WF15130.
- Stambaugh, M.C.; Hammer, L.D. and Godfrey, R. (2015). "Performance of burn-severity metrics and classification in oak woodlands and grasslands", *Remote Sens.*, no. 7, pp. 10501-10522. DOI: 10.3390/rs70810501.
- Tucker, C.J. (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sens. Environ.*, no. 8, pp. 127-150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

- Turner, M.G.; Hargrove, W.W.; Gardner, R.H. and Romme, W.H. (1994). "Effects of Fire on Landscape Heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming", *J. Veg. Sci.*, no. 5, pp. 731-742. DOI: 10.2307/3235886.
- Van Wagtenonk, J.W., Root, R.R. and Key, C.H. (2004). "Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity", *Remote Sensing of Environment*, 92(3), pp. 397-408. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.015>>.
- Veraverbeke, S.; Harris, S. and Hook, S. (2011). Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data, *Remote Sens. Environ.*
- Veraverbeke, S.; Lhermitte, S.; Verstraeten, W.W. and Goossens, R. (2011). "Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper", *Int. J. Remote Sensing*, no. 32, pp. 3521-3537. DOI: 10.1080/01431161003752430.
- Veraverbeke, S.; Verstraeten, W.W.; Lhermitte, S. and Goossens, R. (2010). Evaluating Landsat Thematic Mapper spectral indices for estimating burn severity of the 2007 Peloponnese wildfires in Greece", *Int. J. Wildl. Fire*, no. 19, pp. 558-569. DOI: 10.1071/WF09069.
- Viedma, O.; Quesada, J.; Torres, I.; De Santis, A. and Moreno, J.M. (2015). "Fire Severity in a Large Fire in a Pinus pinaster Forest is Highly Predictable from Burning Conditions, Stand Structure, and Topography", *Ecosystems*, no. 18, pp. 237-250. DOI: 10.1007/s10021-014-9824-y.
- White, J.; Ryan, K.; Key, C. and Running, S. (1996). "Remote Sensing of Forest Fire Severity and Vegetation Recovery", *Int. J. Wildl. Fire*. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1071/WF9960125>>.
- Yan, G.; Mas, J.-F.; Maathuis, B.H.P.; Xiangmin, Z. and Van Dijk, P.M. (2006). "Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches —a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China", *Int. J. Remote Sens.*, no. 27, pp. 4039-4055. DOI: 10.1080/01431160600702632.

Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira

Eurico Lourenço Nicacio Junior*

Recebido 20 de junho de 2018; aceito 14 de outubro de 2018

Abstract

The present paper intends to develop an alternative methodology for prediction of normal-orthometric heights through Brazilian Legal Amazon Rain Forest, a region that imposes logistical-operational difficulties for fieldwork and in which there is considerable precariousness in the Brazilian Fundamental Altimetric Network (BFAN), evidencing the need to improve the network in question to fully align with the current recommendations for the achievement of the International Height Reference Frame. An alternative strategy is based on GNSS observations and the use of global geopotential models (GGMs); alternatively, it uses the national geoid model MAPGEO2015 to evaluate employability. To do so, an approach in three different variants is performed: a) use of absolute and relative approaches for altimetric determination; b) use of GGM extracts obtained in different degrees of development and MAPGEO2015; and c) the use of geoid height and height anomaly for normal-geoid height modeling. Data regarding GNSS observations are extracted from the stations of the SAT-GPS network, coinciding with BFAN stations, with information of both ellipsoidal and normal-orthometric heights; GGMs extracts are obtained pointwisely for the main current combined MGGs. Given the low mean accuracy of data in the study area and its low linkage with BFAN, it is chosen to adopt a test area—the state of Paraná— best suited for elaboration and solidification of the strategy for a later application in the area of study. From the studies conducted in the test area, there is an unquestionable advantage of using the relative approach over the absolute one allied to GGMs, with an average of 72% better results for extracts developed up to

* Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, UFPR, R. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 210, Jardim das Américas, 81531-970, Curitiba, PR, Brasil, e-mail: euriconicaciojr@gmail.com.

degrees 2190 and 720; MAPGEO2015 was an exception to such results, presenting no adequacy to the relative approach. For the other analyzed variables —different functional and GGMs— expected non-standardized behavior is achieved, with only MGG and functional signaling for best modeling the normal-geoid height in the area called optimal configuration. It is discussed a strategy for validating results and treating outliers. A consolidated strategy is then elaborated, which is applied to the study area. With this application, normal-orthometric heights of 602 points are calculated in the Brazilian Legal Amazon Rain Forest, based on the relative method and the optimal configuration for the region. After treatment of outliers, it is verified that this procedure produces an average discrepancy of 13.87 cm in a controllable area, unlike the one with the absolute method and the national geoid model, which produces average discrepancy of 36.28 cm for the same stations. As an additional contribution, an estimate is made for the offset between the Brazilian vertical Data based on the methodology elaborated, resulting in a vertical distance of approximately 1.32 ± 0.07 m, a consistent result regarding other determinations already carried out.

Key words: *normal-orthometric heights; Brazilian Legal Amazon Rain Forest; alternative methodology; GGMs; relative method.*

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia alternativa para predição de altitudes normais-ortométricas ao longo da Amazônia Legal Brasileira, região que impõe dificuldades logístico-operacionais para empreitadas de campo e na qual há considerável precariedade na Rede Altimétrica Fundamental Brasileira (RAFB), evidenciando necessidade de melhoria da rede em questão para um pleno alinhamento às atuais recomendações e esforços para consecução de uma vindoura Rede Internacional de Referência Altimétrica. A estratégia alternativa baseia-se em observações GNSS e na utilização de modelos globais do geopotencial (MGGs); alternativamente, utiliza-se o modelo geoidal nacional MAPGEO2015 para avaliação de empregabilidade. Para tanto, realiza-se uma abordagem com comparação em três variantes distintas: a) utilização dos métodos absoluto e relativo para determinação altimétrica; b) utilização de extratos dos MGGs obtidos em diferentes graus de desenvolvimento e do MAPGEO2015; e c) utilização das funcionais altitude geoidal e anomalia de altitude para modelagem de altitude normal-geoidal. Dados referentes às observações GNSS são extraídos das estações da rede SAT-GPS com coincidência com estações da RAFB, dotadas de informação de altitudes elipsoidal e normal-ortométrica; extratos dos MGG são obtidos ponto-a-ponto para os principais MGGs combinados da atualidade. Tendo em vista a baixa precisão média de dados na área de estudo e sua baixa vinculação com a RAFB, opta-se por adotar uma área-teste —o estado do Paraná— melhor comportada para elaboração e solidificação da estratégia para uma posterior aplicação na área de estudo. Dos estudos realizados na área-

teste, verifica-se inquestionável vantagem de utilização do método relativo sobre o absoluto aliado aos MGGs, sendo em média 72% melhores para extratos desenvolvidos até graus 2190 e 720; o MAPGEO2015 figurou como exceção aos resultados, não havendo adequação com a abordagem relativa. Para as outras variáveis analisadas —diferentes funcionais e MGGs— há esperado comportamento não padronizado, havendo apenas sinalização de MGG e funcional que melhor modelam a altitude normal-geoidal na área denominada configuração ótima. Discute-se, ainda, um estratégia para validação dos resultados e tratamento de *outliers*. Elabora-se, então, uma estratégia consolidada, a qual é aplicada à área de estudo. Com esta aplicação, são calculadas altitudes normais-ortométricas de 602 pontos na Amazônia Legal Brasileira, com base no método relativo e na configuração ótima para a região. Após tratamento de outliers, verifica-se que tal procedimento produz discrepância média de 13,87 cm em uma área controlável, diferentemente do ocorrido com o uso do método absoluto e o modelo geoidal nacional, o qual produz discrepância média de 36,28 cm para as mesmas estações. Como contribuição adicional, realiza-se uma estimativa para o *offset* entre os data verticais brasileiros com base na metodologia elaborada, auferindo-se afastamento de aproximadamente $1,32 \pm 0,07$ m, resultado deveras coerente com as demais determinações já realizadas.

Palavras-chave: *altitudes normais-ortométricas; Amazônia Legal Brasileira; metodologia alternativa; MGGs; método relativo.*

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar una metodología alternativa para predicciones de altitudes normales-ortométricas a lo largo de la Amazonia Legal Brasileña, región que impone dificultades logísticas-operacionales para trabajos de campo y en la que hay considerable precariedad en la Red Altimétrica Fundamental Brasileña (RAFB), evidenciando necesidades de mejora de las redes en cuestión para una completa alineación a las actuales recomendaciones y esfuerzos para la consecución de una Red Internacional de Referencia Altimétrica. Una estrategia alternativa se basa en observaciones GNSS y en la utilización de modelos globales y geopotenciales (MGGs); alternativamente se utiliza el modelo geoidal nacional MAPGEO2015. Para ello, se utiliza un enfoque de comparación de tres variantes distintas: a) utilización de métodos absolutos o relativos para determinación altimétrica, b) utilización de extractos de los MGGs obtenidos en diferentes grados de desarrollo y del MAPGEO2015, y c) utilización de las funcionalidades altitud geoidal y anomalía de altitud para modelado de altitud normal-geoidal. Datos referentes a observaciones GNSS son extraídos de las estaciones de la red SAT-GPS en coincidencia con estaciones RAFB, dotadas de información de altitudes elipsoidal y normal-ortométricas; los extractos de los MGG se obtienen punto a punto para los principales MGG combinados de la actualidad. En vistas de la baja precisión media de datos en

el área de estudio y su baja vinculación con la RAFB, se adopta un área de prueba —el estado de Paraná— que se comporta mejor para la elaboración y consolidación de estrategias para aplicar posteriormente en el área de estudio. De los estudios realizados en el área de estudio, se verifica una incuestionable ventaja de utilización del método relativo sobre el absoluto aliado a los MGG, siendo en promedio un 72% mejores para extractos desarrollados hasta grados 2190 y 720; o MAPGEO2015 como una excepción a los resultados, no habiendo adecuación con el enfoque relativo. Para otras variables analizadas —diferentes funciones y MGGs— se observó un comportamiento no estandarizado, habiendo a la vez una señal de MGG y funcional que mejor modela la altitud normal-geoidal en el área denominada configuración óptima. Se discute, además, una estrategia para la validación de los resultados y tratamiento de *outliers*, y se elaboró una estrategia consolidada que se aplica al área de estudio. Con esta aplicación, se calculan altitudes normales-ortométricas de 602 puntos en la Amazonia Legal Brasileña, con base en el método relativo y en la configuración óptima para la región. Después del tratamiento de *outliers*, se verifica que tal procedimiento produce discrepancia media de 13.87 cm en un área controlable, a diferencia de lo ocurrido con el uso del método absoluto y el modelo geoidal nacional, el cual produce discrepancia media de 36.28 cm para las mismas estaciones. Como contribución adicional, se realiza una estimación para el *off-set* entre los datos verticales brasileños con base en la metodología elaborada, obteniéndose alejamiento de aproximadamente 1.32 ± 0.07 m, resultado verdaderamente coeficiente con las demás determinaciones ya realizadas.

Palabras clave: *altitudes normales-ortométricas; Amazonia Legal Brasileña; metodología alternativa; MGGs; método relativo.*

Contextualização e Estado-da-arte

Conforme já discorrido por renomados geodestas, tais como Hofmann-Wellenhof e Moritz (2006), Torge e Müller (2012) e Gemael (2012), o objetivo primordial da Geodésia é determinar a forma e a dimensão da Terra, bem como do campo da gravidade em seu exterior e suas variações temporais. Entretanto, ao longo das últimas décadas este objetivo tem passado por drásticas mudanças, principalmente devido à evolução das técnicas aplicadas em observações e dos métodos computacionais empregados em seu processamento. Concomitantemente a estes avanços, os problemas clássicos da Geodésia foram expandidos, e sua função primária de medição da superfície terrestre foi ampliada para a detecção dos efeitos de mudanças globais e da geodinâmica (Drewes, 2006).

Este entendimento traz à tona a necessidade de compreensão de entes físicos ligados diretamente à maneira como a superfície terrestre se dispõe e se modifica ao

longo do tempo, gerando uma compreensão de como o Sistema Terra se comporta e trazendo consigo a possibilidade de monitorá-lo de modo contínuo. No entanto, para que isto seja possível, não apenas as observações contínuas são necessárias, mas também sua vinculação a um Sistema Geodésico de Referência Global.

Quando se trata de informações altimétricas, conforme preconizado por IAG (2015), a busca pela definição de um Sistema Vertical de Referência Global (do inglês, International Height Reference System-IHRS) deve ser realizada tomando-se como referência uma superfície equipotencial do campo da gravidade, com valor de geopotencial $W_0 = 62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. Adicionalmente, IAG (2015) determina que as coordenadas verticais primárias para tal sistema de referência sejam definidas com base no número geopotencial C_P , expresso conforme a Equação 1, na qual W_0 representa o valor do geopotencial na superfície de referência e W_P representa o valor do geopotencial no ponto de cálculo.

$$C_P = -\Delta W_P = W_0 - W_P \quad (1)$$

Estas considerações supramencionadas são possíveis, na atualidade, devido principalmente a avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas. Graças ao surgimento de modernas técnicas de análise do campo gravitacional, aliado ao precípua desenvolvimento analítico e matemático segundo formulação adequada, não há mais a dependência de observações de campo ou observações terrestres como fonte única de dados. Um exemplo desta modernização pode ser visualizado nas informações obtidas de missões espaciais, algumas das quais têm por objetivo determinar as perturbações nas órbitas dos satélites. Estas perturbações são induzidas pelo efeito gravitacional de heterogeneidades de massas relativamente a uma distribuição esférica homogênea, gerando conhecimento das anomalias associadas às feições de longos e médios comprimentos de onda deste campo, e completadas com informações de curtos comprimentos de outras fontes. Quando associadas ao potencial centrífugo, viabilizam o estabelecimento de Modelos Globais do Geopotencial-MGGs (Melo, 2011).

Os MGGs são gerados a partir de um conjunto de coeficientes do desenvolvimento do potencial gravitacional em série de funções harmônicas esféricas. Todo esse arcabouço de informações, por fim, propicia a realização de determinações para implantação do IHRS, ao qual as observações altimétricas devem estar vinculadas.

No entanto, tais modificações e avanços não vêm a depor totalmente contra os dados altimétricos já existentes em cada país. A integração entre estes dados já coletados pelos órgãos competentes, visando à adequação à nova modelagem vertical e a eliminação de discrepâncias entre os data verticais nacionais e o *datum* vertical global, pode ser realizada conforme a formulação apresentada pela Equação 2, como adaptado de Santacruz Jaramillo *et al.* (2016), expressa em função da diferença entre

os números geopotenciais de um ponto de cálculo P obtidos segundo o *datum* global (C_P) e o *datum* nacional (C_{Pi}).

$$C_P - C_{Pi} = W_0 - W_{0i} = -\delta W_i \approx \overbrace{[W_0 - (U_P + T_P)]}^I - \overbrace{\sum_j g_{mj} \Delta n_j}^{II} \quad (2)$$

Note que o desenvolvimento da diferença de números geopotenciais à esquerda da Equação 2 culmina na diferença dos termos I e II. O termo I contém a diferença entre o geopotencial de referência W_0 e a soma do esferopotencial U_P em um ponto de interesse P e o potencial perturbador T_P no mesmo ponto P – o primeiro é padronizado, como já descrito neste mesmo item; para o segundo, há fácil equacionamento matemático; para o terceiro, busca-se alternativas na atualidade para sua determinação plena - por meio da solução do Problema de Valor de Contorno da Geodesia (PVCG) - em pontos da superfície. Já o termo II contém o somatório de j produtos discretos entre valores médios da gravidade g_m e desníveis Δn , característicos de conjugação de operações de nivelamento e gravimetria, formando a parte prática da equação. Dessa forma, considerando-se a existência de uma rede de nivelamento com densidade adequada e conjugada com informações de gravimetria ao longo de seu levantamento, é possível unir este conhecimento prático à modelagem matemática teórica cabível e proporcionar o alinhamento com parte das recomendações que buscam a definição do IHRS.

No que diz respeito à integração brasileira a esta tendência mundial, verifica-se carência na união entre prática e teoria. Atualmente, a Rede Altimétrica Fundamental Brasileira (RAFB) - denominada Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e vinculada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) conta com aproximadamente 69.859 estações de altitudes normais-ortométricas (altitudes obtidas por nivelamento geométrico e corrigidas do não-paralelismo das superfícies equipotenciais do campo da gravidade) conhecidas, distribuídas ao longo do território nacional (IBGE, 2011). Todavia, a maneira não-uniforme com que se distribui, a inexistência de vínculo de parte da rede com o Datum Vertical Brasileiro em Imbituba (DVB-I) e a existência de grande quantidade de ramais, os quais impossibilitam o ajustamento das altitudes trazem à tona um problema maior do que a aparentemente simples conversão e adequação às recomendações do IHRS vindouro: as deficiências atuais da RAFB. É possível verificar que, na Região Amazônica, deve haver um esforço para preenchimento de informações altimétricas, visando a uma melhor solução para o alinhamento ao IHRS.

Surge, então, a perspectiva de modelagem das altitudes normais-ortométricas H^{Nort} nas regiões de vazío tomando por base altitudes elipsoidais h – provenientes de

observações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) discretas – e valores de altitude normal-geoidal η – provenientes de cálculo de funcionais de MGGs. Esta modelagem baseia-se na resolução da equação 3, descrita como método absoluto, e cujos termos já foram definidos para um dado ponto P (Gemael, 2012).

$$h_p \approx H^{NOrt}_p + \eta_p \Leftrightarrow H^{NOrt}_p \approx h_p - \eta_p \quad (3)$$

Como o enfoque principal deste trabalho reside na determinação de altitudes normais-ortométricas, em consonância com a RAFB, uma outra observação deve ser feita a seu respeito e sobre o exposto na equação 3. Conforme abordado por Ferreira *et al.* (2013), o fato do comportamento das altitudes normais-ortométricas não apresentarem um significado completamente físico faz com que estas estejam referidas a uma superfície de referência diferente das usuais geoide e quasi-geoide. Em virtude disso, a referência supracitada descreve a dependência entre as altitudes elipsoidais e as altitudes normais-ortométricas aos moldes da Equação 3, na qual η é por eles denominada como altitude normal-geoidal, em analogia à altitude normal-ortométrica.

Uma representação da equação 3 é apresentada na porção à esquerda da Figura 1, a qual descreve a relação entre as variáveis supramencionadas para o ponto P em questão e considerando a melhor modelagem da altitude normal-geoidal η pela própria altitude geoidal N .

Todavia, chama-se a atenção para o seguinte fato: tanto os MGGs que dão origem às funcionais utilizadas para modelar altitudes normais-geoidais desejadas, quanto outros modelos de ondulação geoidal, como o nacional MAPGEO2015, contêm erros inerentes a seu sistema de processamento e a seu modo de obtenção na forma: $\eta_p^{modelo} = \eta_p^{real} + \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \eta_p^{modelo} - \eta_p^{real}$, que variam segundo parâmetros de especificação do modelo (Barthelmes; Köhler, 2016). Para solucionar este problema, Arana (2000) e Featherstone (2002) propõe a utilização do método relativo ao invés do método absoluto, o qual se baseia na utilização de um ponto origem P_0 como referência, com altitude normal-ortométrica H^{NOrt}_0 , altitude elipsoidal h_0 e altitude normal-geoidal η_0 conhecidas e pela abordagem matemática apresentada na Equação 4.

$$\begin{cases} H^{NOrt}_0 \approx h_0 - \eta_0^{modelo} = h_0 - \eta_0^{real} + \varepsilon \\ H^{NOrt}_p \approx h_p - \eta_p^{modelo} = h_p - \eta_p^{real} + \varepsilon \end{cases} \Rightarrow H^{NOrt}_p = H^{NOrt}_0 - h_0 + h_p - \eta_0 + \eta_p \quad (4)$$

Ainda, a já mencionada Figura 1, quando analisada por completo, traz a representação da relação apresentada na Equação 4, novamente considerando a modelagem da altitude normal-geoidal η pela altitude geoidal N .

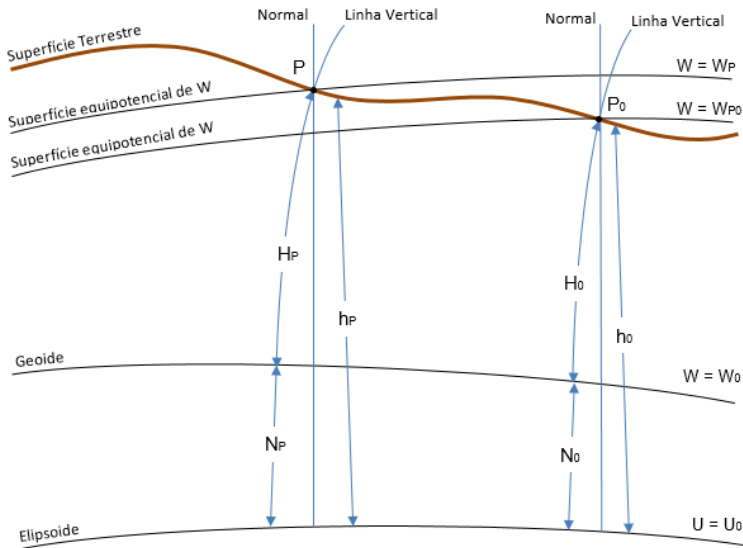


Figura 1. Modelagem altimétrica baseada em altitude elipsoidal e altitude geoidal.
Fonte: Nicacio, 2017.

Por fim, frisa-se que a alternativa apresentada anteriormente é reforçada por Sánchez (2016), principalmente sob o aspecto de consecução de sistemas de referência vertical. Segundo adaptado desta referência, as atuais técnicas geodésicas, principalmente aquelas apoiadas por posicionamento e navegação satelital, apresentam requisitos de precisão superiores àqueles propiciados pela Equação 3. Sendo assim, a utilização do método relativo para correlacionar altitude elipsoidal e altitude normal-ortométrica com a altitude normal-geoidal, conforme reescrito na Equação 5, deve ser utilizado para fins de maior precisão e para a viabilização de modernos e precisos sistemas de referência vertical.

$$H_P = H_0 - h_0 + h_p - \eta_0 + \eta_P \Leftrightarrow \Delta H = \Delta h - \Delta \eta \quad (5)$$

Desta forma, a abordagem de determinação de altitude normal-ortométrica pelo método relativo, com o uso de observações GNSS discretas e informações geoidais provenientes de Modelos Globais do Geopotencial, apresenta grande potencial de solução para a densificação da RAFB na região da Amazônia Legal Brasileira e, conseqüentemente, para viabilizar o alinhamento da rede ao IHRs e sua conveniente materialização. Justifica-se, portanto, a realização do presente trabalho, que visa a verificar a possibilidade e a viabilidade da referida abordagem para a área estudada.

Materiais e métodos

Dados altimétricos e GNSS

Conforme discorrido por IBGE (2017), o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) é composto fundamentalmente pelas redes vertical, horizontal e gravimétrica. Com o advento das tecnologias espaciais de posicionamento, estas redes abrangem na atualidade todo o território nacional. No que diz respeito à rede planimétrica, uma de suas vertentes, na atualidade, é a rede geodésica composta por estações SAT-GPS, ou seja, estações cujas coordenadas foram determinadas por meio de rastreamento e obtenção de informações da constelação GPS. Ainda segundo a referência citada, a rede SAT-GPS fornece um referencial com abrangência nacional para usuários que precisem de informações posicionais para diversos fins, como apoio ao mapeamento, demarcação de unidades político-administrativas, obras de engenharia, regulamentação fundiária, posicionamento de plataformas de prospecção de petróleo, delimitação de regiões de pesquisas geofísicas, entre outros. Além de informações planimétricas, as estações GNSS fornecem também coordenadas altimétricas referenciadas ao elipsoide – as altitudes elipsoidais.

Optou-se por realizar o acesso às informações geoespaciais por meio do Visualizador da INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, 2016) principalmente por ser possível realizar o *download* das referidas informações em formato *shapefile*. Esta característica possibilitou integração com ferramentas de geoprocessamento, como o *software* QGIS, a realização de operações espaciais com os dados, como recorte e interseção conforme necessário, e a fácil exportação das informações *shapefile* para outros formatos, em vistas de integrá-las a algoritmos desenvolvidos pelo autor.

Para a obtenção de dados da RAFB, também foi utilizado o Visualizador da INDE, com operação similar e visando a alcançar as vantagens já citadas. Um detalhamento sobre quantos e quais pontos foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa é fornecido no item que discorre sobre área de estudo e área-teste.

Modelos Globais do Geopotencial empregados e o Modelo Geoidal Nacional

O primeiro modelo baseado não apenas na solução de estimativas de um conjunto de anomalias de gravidade provenientes de observações de órbitas satelitais, mas também provido de observações gravimétricas, observações sobre a topografia do terreno e de altimetria por satélite foi o EGM2008 (Pavlis *et al.*, 2012). Este modelo foi considerado revolucionário à época de sua elaboração e lançamento, devido à grande quantidade de informações utilizadas para geração dos coeficientes de seu desenvolvimento em harmônicos esféricos e, conseqüentemente, de seu possível desenvolvimento até grau 2159, sendo completado em zonais até grau 2190. Levando em

consideração esta mesma característica, foram selecionados para emprego no presente trabalho modelos combinados – ou seja, que integram informações gravitacionais derivadas de estudo de órbitas satelitais, informações de gravimetria terrestre e informações de altimetria por satélite – com possibilidades compatíveis com as do modelo EGM2008, principalmente no que diz respeito ao alto grau de desenvolvimento e à alta resolução espacial. A lista e as características dos modelos utilizados encontram-se na Tabela 1. Na dissertação, é realizada uma descrição detalhada sobre cada um dos modelos, a qual é omitida do presente artigo mas pode ser verificada em Nicacio e Dalazoana (2017).

Tabela 1
MGGs utilizados no trabalho

<i>Modelo</i>	<i>Grau/Ordem empregados</i>	<i>Ano</i>
XGM2016	719 e 360	2017
GOCO05C	720 e 360	2016
GGM05C	360	2016
EIGEN-6C4	2190, 720 e 360	2014
EGM2008 e 360	2190, 720 2008	

Fonte: adaptado de Nicacio (2017).

Reforça-se que, além das justificativas ora apresentadas, embasa-se esta escolha com resultados e desempenhos positivos para modelos combinados, em especial o próprio EGM2008, em estudos ao longo de todo o planeta, tais como Arábia Saudita (Al-Ghamdi; Dawod, 2014), Alemanha (Voigt; Denker, 2015), Polônia (Godah *et al.*, 2015), América do Sul (Matos *et al.*, 2015), África (Abd-Elmotaal, 2015) e, nacionalmente, na Amazônia oriental (Moreira, 2015).

Para a obtenção de extratos de funcionais dos MGGs a partir do serviço de cálculo no sítio do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*), organização responsável por armazenar, gerir e disponibilizar os modelos ao usuário, optou-se por uma abordagem ponto-a-ponto em detrimento de uma geração em grade e posterior interpolação, a fim de preservar a precisão e as características de cada modelo. Para tanto, foi desenvolvida e empregada a ferramenta SPGG – *Single Point GEM [Global Earth Models] Generator*, uma aplicação *standalone* capaz de gerar extratos dos modelos globais do geopotencial de forma pontual, utilizando uma lista de pontos elaborada e formatada pelo usuário e com a interação direta com o serviço *web* do ICGEM (Nicacio, 2016).

Adicionalmente ao uso dos MGGs, utilizou-se para modelagem da altitude normal-geoidal o modelo geoidal nacional MAPGEO2015, elaborado em conjunto pelo IBGE e pela EPUSP—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, fruto de mais de duas décadas de cooperação e de melhorias de versões anteriores. Trata-se de um modelo de ondulação geoidal disponibilizado juntamente com um sistema de interpolação que possibilita aos usuários a obtenção de altitude geoidal em um ponto ou em um conjunto de pontos do território nacional a partir de suas coordenadas. Sua abrangência cobre a área compreendida pelas latitudes 6 °N e 35 °S e pelas longitudes 75°W e 30°W, referenciadas ao SIRGAS 2000 (IBGE, 2015). Apesar de, claramente, uma análise do exposto em relevantes trabalhos, como IBGE (2015) e Blitzkow *et al.* (2016), demonstrar que o MAPGEO2015 apresenta melhorias significativas em relação ao MAPGEO2010, adequando-se com precisão centimétrica ao território nacional e em média apresenta diferença nula com valores reais, sua utilização neste trabalho se dá em forma de avaliação e comparação com os MGGs atuais. Isto porque trabalhos anteriores, tais como Melo (2011) e Jamur *et al.* (2010), demonstram baixa aderência do modelo geoidal nacional em determinadas regiões do país, em detrimento de uso de MGGs. Adicionalmente, a carência de outros trabalhos acadêmicos empregando e avaliando o uso do MAPGEO2015 estimulam seu uso no presente trabalho.

Área de estudo e área-teste

Conforme já abordado anteriormente, a área de estudo do presente trabalho é a Amazônia Legal Brasileira. Trata-se de uma área de cerca de 5 milhões de quilômetros quadrados —correspondendo a aproximadamente 59% do território brasileiro— e que, atualmente, corresponde à área dos Estados da Região Norte do Brasil, acrescidos da totalidade do Estado de Mato Grosso e dos municípios do Estado do Maranhão situados a oeste do meridiano 44 °O. Todavia, no que diz respeito à existência de estações que atendam aos pressupostos apresentados até o momento, a área de estudo conta com 154 estações SAT-GPS que possuem conexão com a RAFB – doravante denominadas estações GNSS-RN, distribuídas de forma não-homogênea e perfazendo a área de estudo de referência inicial, conforme Figura 2.

Entretanto, levando-se em consideração a baixa confiabilidade e disponibilidade de dados na área de estudo para fomentar a elaboração de uma metodologia consistente – entenda-se: baixa vinculação à RAFB, encontrando-se em sua maioria em ramais da rede; baixa precisão das altitudes normais-ortométricas; entre outros óbices – julgou-se cabível a adoção de uma área-teste consistente. Esta área-teste foi o estado do Paraná, o qual contava inicialmente com 32 estações GNSS/RN distribuídas de maneira não-uniforme, conforme Figura 3.

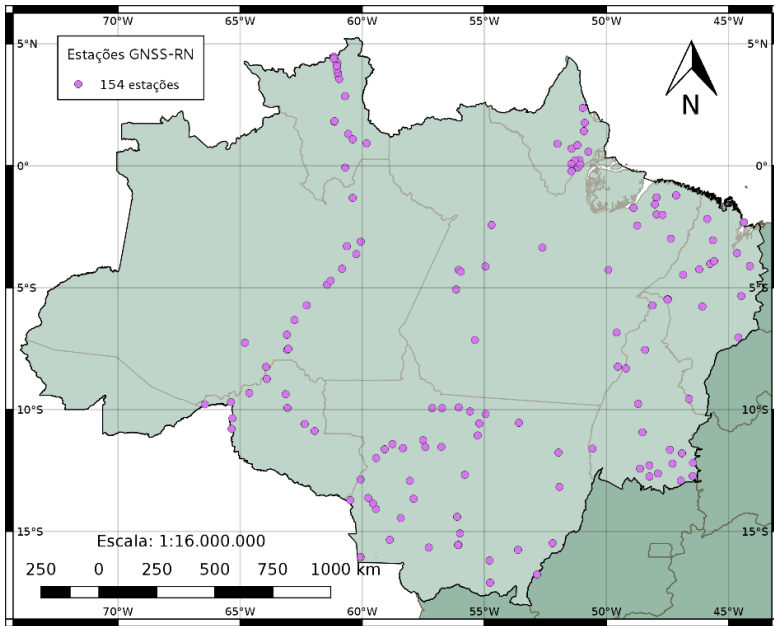


Figura 2. Área de estudo de referência inicial – 154 estações GNSS/RN.
Fonte: Nicacio, 2017.

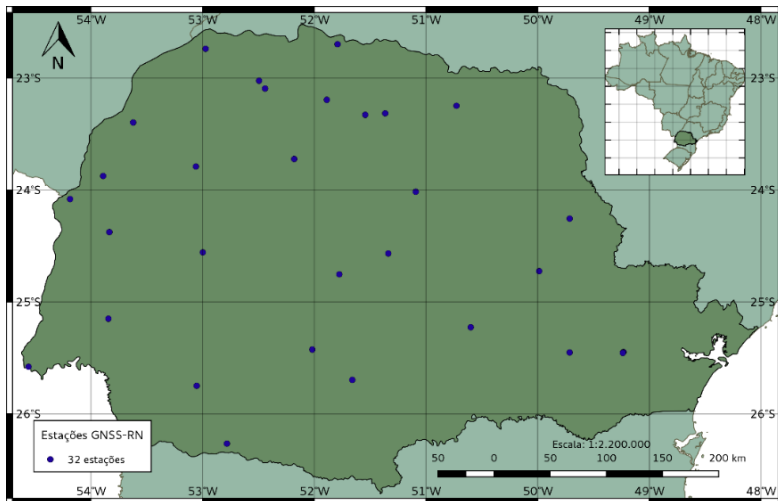


Figura 3. Área de teste de referência inicial – 32 estações GNSS/RN.
Fonte: Nicacio, 2017.

Como, novamente, a elaboração da metodologia poderia ser prejudicada pela não-homogeneidade das estações, realizou-se um procedimento para identificação e seleção de estações baseado em coerência entre mútuas distâncias quando comparadas às resoluções espaciais dos MGGs empregados e em análise de suas precisões altimétricas (Nicacio, 2017). Para exemplificar, tome-se como exemplo a obtenção de extratos de MGG com grau máximo de desenvolvimento 720, cujas resoluções seriam, consonante Seeber (2003, p. 469) da ordem de $20.000/720$, aproximadamente igual a $27,78 \text{ km}$. Assim, estações GNSS/RN que distem menos de $27,78 \text{ km}$ entre si devem ser eliminadas, com exclusão daquelas que possuem menores precisões.

Destarte, seguindo estes critérios, a quantidade de estações na área-teste de referência final utilizada no presente trabalho foi subdividida da seguinte forma: foram utilizados 22 pontos para modelos desenvolvidos até grau 360, 27 pontos para modelos desenvolvidos até grau 720 e 29 pontos para modelos até grau 2190.

Ainda, para a área de estudo e para a área-teste, foi identificado um conjunto de pontos denominado área desejada, na qual deseja-se realizar a determinação das altitudes normais-ortométricas por meio da estratégia elaborada. A área de estudo desejada é composta por 602 estações SAT-GPS, ao passo que a área-teste desejada é composta por 127 estações da mesma rede.

Estratégia para determinação de altitudes normais-ortométricas

Para fins de elaboração da estratégia, foram usadas três vertentes distintas de análise para determinação das altitudes normais-ortométricas: a) utilização dos métodos absoluto e relativo para determinação altimétrica; b) utilização de extratos dos MGGs obtidos em diferentes graus de desenvolvimento e do MAPGEO2015; e c) utilização das funcionais altitude geoidal e anomalia de altitude para modelagem de altitude normal-geoidal. Em cada uma delas, elencou-se como mais vantajosa aquela que minimizava o módulo da discrepância entre os valores de altitude normal-ortométrica de referência ($H_P^{NOrt_{ref}}$), já possuídos pelos pontos, e os valores calculados ($H_P^{NOrt_{calc}}$) por meio das vertentes anteriores.

Por exemplo, para fins da comparação entre os métodos absoluto e relativo, considerando-se que as altitudes normais-ortométricas são determinadas pelo método absoluto por intermédio da equação 3, ao passo que estas são determinadas pelo método relativo por intermédio da equação 4, considerou-se com melhor desempenho aquela que tornou verdadeira a expressão 6.

$$\begin{cases} H_P^{NOrt} \\ H_P^{NOrt} \end{cases} \begin{matrix} \text{relativo} \\ \text{absoluto} \end{matrix} \Rightarrow \text{mín} \left| H_P^{NOrt_{ref}} - H_P^{NOrt_{calc}} \right| \quad (6)$$

Cada vertente foi analisada individualmente com vistas a escolha das melhores opções para a estratégia consolidada. Adicionalmente, por ocasião do uso do método

relativo, tal como apontado por Nicacio (2017), dentre os possíveis limitantes para o posicionamento do ponto P_0 , optou-se por adotar aquele posicionado de forma mais centralizada na área do conjunto de pontos considerado, para fins de homogeneização das linhas de base desta determinação.

Principais resultados obtidos

Resultados para a área-teste

Através dos estudos realizados para a área-teste, foi possível atestar os principais resultados conforme gráfico apresentado na Figura 4. Neste gráfico, as discrepâncias médias por conjunto de pontos, obtidas por meio do método relativo são representadas por linhas contínuas, ao passo que aquelas obtidas pelo método absoluto são representadas por linhas tracejadas. Na legenda do gráfico, estão destacados no retângulo magenta as representações obtidas pela funcional altitude geoidal e no retângulo ciano aquelas obtidas pela funcional anomalia de altitude.

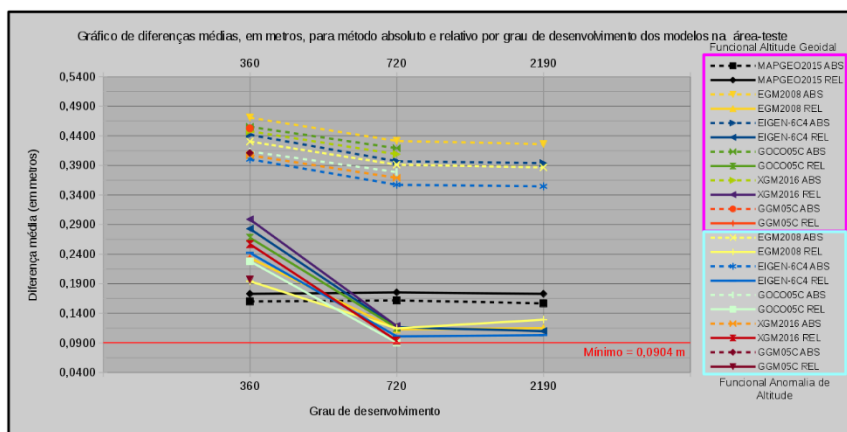


Figura 4. Gráfico de diferenças médias, em metros, para método absoluto e relativo por grau de desenvolvimento dos modelos na área-teste.

Fonte: Nicacio, 2017.

Da figura em questão, pode-se verificar que o desempenho do uso do método relativo é, conforme esperado deveras superior ao uso do método absoluto para os MGGs; Este padrão, no entanto, não é conservado pelo MAPGEO2015. Adicionalmente, não há padrão de comportamento no tocante às diferentes funcionais do geopotencial para modelagem da altitude normal-geoidal, bem como não há escolha crassa para uso de distintos graus de desenvolvimento – exceção feita para extratos desenvolvidos até grau 360, os quais tiveram desempenho aquém do esperado.

Observe-se, ainda, na Figura 4, a existência de uma configuração que minimizou a discrepância média do conjunto de pontos ao qual ela foi aplicada, da forma da equação 7, na qual há o cálculo da discrepância individual θ_i para cada um dos i pontos de um conjunto de n pontos. Esta configuração foi denominada “configuração ótima” e, para este conjunto de pontos, foi o MGG GOCO05C, desenvolvido até grau 720 e segundo a funcional anomalia de altitude. Com esta configuração, obteve-se discrepância média $\theta_m = 0,0904 \text{ m} = 9,04 \text{ cm}$.

$$\theta_i = \left| H_P^{Nort}_{ref} - H_P^{Nort}_{calc} \right| \Rightarrow \theta_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (7)$$

Para a área-teste pode-se, por fim, elaborar a Tabela 2, a qual demonstra os ganhos impostos pela utilização da metodologia alternativa, que contempla o uso dos MGGs em sua configuração ótima associados ao método relativo, em comparação a uma metodologia denominada tradicional, que contempla o uso do MAPGEO2015 associado ao método absoluto. Estas estimativas finais foram realizadas após uma fase de identificação visual e eliminação de *outliers*, ou seja, pontos cuja modelagem não foi bem executada segundo nenhuma das configurações utilizadas.

Tabela 2
Comparativo entre metodologia proposta e metodologia tradicional na área-teste

	<i>Metodologia alternativa</i>			<i>Metodologia tradicional</i>		
	θ (m)	σ^2 (m ²)	σ_0 (m)	θ (m)	σ^2 (m ²)	σ_0 (m)
Máxima	0,1487			0,5304		
Média	0,0621	0,0015	0,0393	0,1678	0,0118	0,1085
Mínima	0,0005			0,0022		

Fonte: Nicacio (2017).

Sendo assim, os ganhos da aplicação da metodologia ora proposta foram reais e de grande significância para a aplicação da estratégia alternativa, sendo em média superiores a 10 centímetros para a área-teste. Estes resultados apontaram no sentido de refinamento da metodologia utilizada, elaboração de uma metodologia consolidada e sua precípua aplicação na área de estudo.

Estratégia alternativa consolidada

Da análise da Figura 4, bem como de outras análises realizadas, verificou-se os tópicos apresentados a seguir. Estes foram considerados por ocasião da elaboração da estratégia alternativa consolidada, aplicável à área de estudo e extensível a demais áreas onde se almeje realizar abordagem similar.

- O uso do método relativo é comprovadamente mais adequado que o método absoluto para manipulação dos MGGs; estes devem, portanto, incorporar a estratégia definitiva;
- A partir de todo o conjunto de pontos disponíveis em uma determinada área, deve ser mantida a seleção e priorização de pontos para homogeneização de dados, segundo diferentes graus de desenvolvimento dos extratos dos MGGs e suas resoluções espaciais;
- Em virtude de seu desempenho aquém do esperado e de sua inadequação para uso segundo os pressupostos do método relativo, a funcional altitude geoidal obtida por meio do modelo geoidal nacional MAPGEO2015 deve ser descartada da estratégia consolidada;
- Quando da utilização do método relativo, deverá ser adotado o ponto P_0 mais próximo do centro da área estudada, como aproximação primária para seu bari-centro, haja visto que esta consideração demonstra-se suficientemente eficaz para o princípio que ora se propõe e que outras configurações testadas não apresentaram ganho significativo;
- Quando da obtenção de extratos dos MGGs serão utilizados os modelos EGM2008, EIGEN-6C4, GOCO05C e XGM2016, segundo grau de desenvolvimento 720 e 2190 - exceção feita ao MGG XGM2016, para o qual será utilizado seu grau máximo 719 – em virtude destes originarem funcionais do geopotencial que melhor representam a altitude normal-geoidal;
- Ainda quando da obtenção de extratos dos MGGs, serão consideradas as funcionais anomalia de altitude e altitude geoidal, vislumbrando a modelagem da altitude normal-geoidal, uma vez que não houve comportamento padronizado para os resultados neste aspecto;
- A escolha da configuração ótima se dará para o MGG, o grau de desenvolvimento e a funcional que minimizarem o fator θ_m para o conjunto de pontos estudado;
- Após a determinação das altitudes normais-ortométricas em área desejada, deve ser realizada uma validação dos resultados em uma área desejada controlável, com precíua eliminação de *outliers*;

Avanços na determinação de altitudes normais-ortométricas na área de estudo

Analogamente ao desenvolvido na área-teste, realizou-se a busca por uma configuração ótima na área de estudo, a qual foi identificada como o GGM XGM2016, desenvolvido até grau 719 e segundo a funcional anomalia de altitude; segundo esta configuração, obteve-se discrepância média $\theta_m = 0,2160 m = 21,60 cm$. A Figura 5 apresenta gráfico similar àquele disposto na Figura 4, para esta área.

Para a área de estudo pode-se, também, elaborar a Tabela 3, a qual demonstra os ganhos impostos pela utilização da metodologia alternativa em comparação a uma metodologia tradicional, analogamente ao realizado na Tabela 2. Novamente, estas estimativas finais foram realizadas após uma fase de identificação e eliminação de *outliers*, baseada em um critério de até um desvio-padrão de diferença em relação à

média do conjunto de pontos. Das 136 estações GNSS/RN utilizadas para este fim, 22 foram eliminadas com este critério, indicando possíveis problemas em suas determinações altimétricas originais.

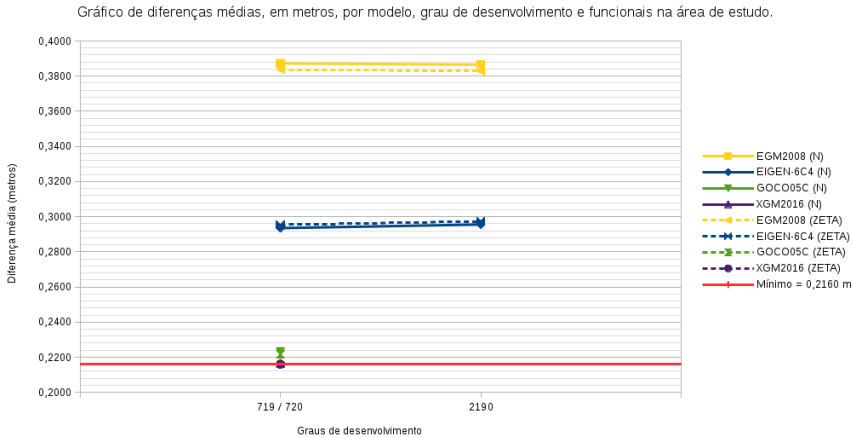


Figura 5. Gráfico de diferenças médias, em metros, para método absoluto e relativo por grau de desenvolvimento dos modelos na área de estudo.
Fonte: Nicacio, 2017.

Tabela 3
Comparativo entre metodologia proposta e metodologia tradicional na área de estudo

	<i>Metodologia alternativa</i>			<i>Metodologia tradicional</i>		
	θ (m)	σ_{θ}^2 (m ²)	σ_{θ} (m)	θ (m)	σ_{θ}^2 (m ²)	σ_{θ} (m)
Máxima	0,3665			0,9029		
Média	0,1387	0,0112	0,1057	0,3628	0,0468	0,2164
Mínima	0,0006			0,0244		

Fonte: Nicacio (2017).

Sendo assim, novamente atesta-se que os ganhos da aplicação da metodologia ora proposta são reais e de grande significância para a aplicação da estratégia alternativa. Estes resultados confirmam a superioridade da metodologia e da estratégia consolidada utilizadas, proporcionando ganhos superiores a 20 centímetros para determinações altimétricas na complexa Região Amazônica.

Estimativa do off-set entre DVB-I e DVB-S

Ao final dos trabalhos, verificou-se ainda a possibilidade de realizar uma nova estimativa da separação vertical (*off-set*) entre os *data* verticais brasileiros - DVB-I, em Imbituta-SC, e DVB-S, em Santana-AP – com base no uso da metodologia proposta. Aprofundamentos sobre esta abordagem podem ser encontrados no trabalho original; entretanto, os resultados encontrados mostram-se deveras consistentes com aqueles já obtidos anteriormente, conforme apontado na tabela 4. As principais discrepâncias são devidas às imprecisões dos dados de entrada para a metodologia, bem como a diferentes abordagens para solução do problema.

Tabela 4
Atualização de autores e valores determinados de off-set entre *data* verticais

<i>Autor</i>	<i>Off-set (m)</i>
Nicacio (2017)	1,320 ± 0,07 m
De Freitas <i>et al.</i> (2016)	1,416 ± 0,12 m
Moreira (2015)	1,300 ± 0,11 m
Castro e De Freitas (2014)	1,301 a 1,420 m
Castro (2011)	1,320 m ou 1,430 m

Fonte: Nicacio (2017).

Conclusões e Contribuições do Trabalho

Foi desenvolvida uma ferramenta, em duas versões conforme necessidade, para rápida obtenção de extratos de MGGs ponto-a-ponto com acesso direto ao serviço *web* do ICGEM: o SPGG (Nicacio, 2016). Com seu uso, foram obtidos dados necessários para este e para outros trabalhos, de tal maneira que o usuário regular não necessite realizar manipulações matemáticas complexas com os coeficientes do desenvolvimento dos modelos em harmônicos esféricos, tampouco dependa da interação repetitiva com o referido serviço. Esta ferramenta encontra-se disponível para *download* no endereço da referência e pode ser livremente utilizada pela comunidade, principalmente para o público que necessita trabalhar com extratos de modelos globais e não deseja realizar uma manipulação direta de seus coeficientes.

Foi analisado o desempenho do uso do método relativo ante ao método absoluto para predições altimétricas baseadas no uso de MGGs e de altitudes elipsoidais. Esta pode ser considerada a principal contribuição do presente trabalho, tendo em vista que os resultados das análises a ela referentes indicam que a maneira ideal de lidar com os MGGs e suas funcionais é, de fato, com o uso do método relativo, tomadas

precauções quanto ao pleno alinhamento com conceitos físicos atinentes. Foi analisado o desempenho de expoentes MGGs combinados da atualidade em porções específicas do território nacional - a saber, estado do Paraná e Amazônia Legal Brasileira - quanto à adequação para modelagem da altitude normal-geoidal. Esta contribuição fomentou ainda a confecção de artigo acadêmico com abrangência do território nacional em completude.

Foram desenvolvidas especificações e orientações quanto à metodologia alternativa para predição de altitudes normais-ortométricas com base em MGGs e suas funcionais, observações GNSS e uso do método relativo, com vistas a densificar a informação altimétrica na região de carência na Amazônia Legal Brasileira. Estas orientações podem ser expandidas para emprego em todo o território nacional conforme necessidade, desde que conservadas as precauções imperativas descritas ao longo do trabalho. Os estudos demonstraram uma necessidade de revisão em normativas existentes que apontam para o uso do método absoluto como alternativa para o nivelamento geométrico quando da predição de altitudes normais-ortométricas, como aquelas preconizadas por Aneel (2009, p. 23) para pequenas centrais hidrelétricas, e a implementação de normatização para uso dos MGGs.

Por fim, proveu-se uma nova estimativa para o afastamento entre os *data* verticais brasileiros, baseado no emprego da metodologia desenvolvida. Seu resultado coerente com as demais estimativas existentes confirmam a correção da metodologia desenvolvida e dos processos empregados, somando-se a estes resultados anteriores como possíveis valores para o *off-set* em questão.

Bibliografia

- Abd-Elmotaal, H.A. (2015). "Validation of GOCE Models in South Africa", *Newton's Bulletin, Assessment of GOCE Geopotential Models*, vol. 5, pp. 149-162.
- Al-Ghamdi, K.A. and Dawod, G.M. (2014). "Accuracy Assessment of Global Geopotential Models for GIS and Geomatics Applications in Makkah Metropolitan Area", in *The 9th National GIS Symposium in Saudi Arabia*, Saudi Arabia.
- Aneel (2009). *Diretrizes para elaboração de serviços de Cartografia e Topografia, relativos a estudos e projetos de aproveitamento hidrelétricos*, Superintendência de Gestão e Estudos Hidroenergéticos (SGH).
- Arana, J.M. (2000). "O uso do GPS na elaboração da carta geoidal", Tese Doutorado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Barthelmes, F. and Köhler, W. (2016). "International Centre for Global Earth Models (ICGEM)", in Drewes H.; Kuglitsch, F. and Adam, J. (eds.), *The Geodesists Handbook 2016. Journal of Geodesy*, vol. 90, cap. 10, pp. 907-1205.

- Blitzkow, D.; Matos, A.C.O.C.; Machado, W.C.; Nunes, M.A.; Lengruher, N.V.; Xavier, E.M.L. and Fortes, L.P.S. (2016). "MAPGEO2015: O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil", *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 68, no. 10, pp. 1873-1884.
- Castro, H.M. (2011). "*Proposta de Alternativas para conexão dos Data Verticais Brasileiros de Imbituba e Santana*", Dissertação Mestrado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Castro, H.D.M. and De Freitas, S.R.C. (2014). "Strategies for Connecting Imbituba and Santana Brazilian Datums Based on Satellite Gravimetry and Residual Terrain Model", in Rizos, P.W.C. (ed.), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*, Berlin, Springer, vol. 139, pp. 543-550.
- De Freitas, S.R.C.; Santacruz Jaramillo, A.G.; Luz, R.T.; Ferreira, V.G.; Castro, H. D.M. and Sánchez, J.L.C. (2016). "Connection of the two segments of the Brazilian Vertical Reference Network", in *1st Joint Commission 2 and International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016*, Thessaloniki, Grécia.
- Drewes, H. (2006). "The changing objectives in geodetic research", *Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement*, vol. 131, no. 5, pp. 1-7.
- Featherstone, W.E. (2002). "Expected contributions of dedicated satellite gravity field missions to regional geoid determination with some examples from Australia", *Journal of Geospatial Engineering*, vol. 4, pp. 2-19.
- Ferreira, V.G.; Zhang, Y. and De Freitas, S.R.C. (2013). "Validation of GOCE gravity field models using GPS-leveling data and EGM08: a case study in Brazil", *Journal of Geodetic Science*, vol. 3, no. 3, pp. 209-218.
- Gemael, C. (2012). *Introdução à Geodésia Física*, Curitiba, Editora UFPR.
- Godah, W.; Krynski, J. and Szelachowska, M. (2015). "On the accuracy assessment of the consecutive releases of GOCE-based GGMs over the area of Poland", *Newton's Bulletin. Assessment of GOCE Geopotential Models*, vol. 5.
- Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*, 2nd. ed. Graz, Austria, Springer-Verlag Wien.
- IAG (2015). *Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRIS)*, München, Alemanha.
- IBGE (2011). *Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro*, Rio de Janeiro.
- (2015). *Relatório de Desenvolvimento do MAPGEO2015*, Rio de Janeiro.
- (acesso em 2017). *SGB – Sistema Geodésico Brasileiro*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_sgb_int.shtm>.
- INDE (acesso em 2016). *Visualizador da INDE*. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br/>>.

- Jamur, K.P.; Melo, L. and De Freitas, S.R.C. (2010). “Avaliação dos Modelos do Campo da Gravidade Terrestre advindos da Missão GOCE – Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer”, in *Reunión Anual SIRGAS 2010*, Lima, Peru. Boletín Informativo no. 15 SIRGAS Reporte 2009-2010.
- Matos, A.C.O.C.; Guimarães, G.N.; Lobianco, M.C.B. and Campos, I.O. “Evaluation of Recent GOCE Geopotential Models in South America”, *Newton’s Bulletin, Assessment of GOCE Geopotential Models*, vol. 5, pp. 83-104.
- Melo, L.F.S. (2011). “Avaliação de modelos globais do geopotencial para os estados do Maranhão e Piauí”, dissertação Mestrado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Moreira, R.M. (2015). “Conexão de Sistemas Verticais de Referência Locais ao Sistema Geodésico Brasileiro com base em um Sistema Vertical de Referência Global”, Tese Doutorado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Nicacio, E.L. (acesso em 2016). “SPGG - Single Point GEM Generator”. Disponível em: <<http://euriconicacio.github.io/spgg/>>.
- (2017). “Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira”. Dissertação Mestrado em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Nicacio, E.L.; Dalazoana, R. (2017). “Passado e Presente dos Modelos Globais do Geopotencial: Uma Abordagem Conceitual Sobre sua Evolução”, *Revista Eletrônica Multidisciplinar FACEAR*, vol. 2, pp. 1-15.
- Pavlis, N.K. et al. (2012). “The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, no. B04406, pp. 1-38.
- Sánchez, L. (2016). “Sistemas de referencia vertical”, in *Taller SIRGAS en Sistemas Verticales de Referencia 2016*, Quito, Ecuador.
- Santacruz Jaramillo, A.G. et al. (2016). “Estrategias para la conexión de redes verticales heterogéneas con base en el PVMG en la forma fija”, in *Symposium SIRGAS 2016*, Quito, Ecuador.
- Seeber, G. (2003). “*Satellite Geodesy: foundations, methods and applications*”, Berlin-New York, Walter de Gruyter.
- Torge, W. and Müller, J. (2012). *Physical Geodesy*, 4th. ed. Berlin-Boston, Walter de Gruyter, 2012.
- Voigt, C. and Denker, H. (2015). “Validation of GOCE Gravity Field Models in Germany”, *Newton’s Bulletin, Assessment of GOCE Geopotential Models*, vol. 5, pp. 37-48.

Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas

Wendy Romero-Rojas*
René Vázquez-Jiménez**
Rocío N. Ramos-Bernal**

Recibido 18 de agosto de 2018; aceptado 29 de octubre de 2018

Abstract

The processes of mass removal are recurrent geological processes and represent a latent threat in the State of Guerrero, due to its link with extraordinary hydrometeorological events. In several studies that characterize these processes, Remote sensing techniques are applied, and the information is integrated through Geographical Information System (GIS). The model of susceptibility to mass removal processes included the interpretation of physical factors that intervene in these processes, which were characterized by different thematic maps. The final generation of the model consisted in the final accumulation of the individual contributions of each factor (Recondo, 2000; Hervas y Barredo, 2001; Hervas *et. al.*, 2002), which represented a zoning by susceptibility index; the corroboration of the data was carried out through an inventory of landslides, generated through online image interpretation, applying the Google Earth tools. The results indicated that the model of susceptibility to mass

* Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Lázaro Cárdenas s/n, CU, 39070, Chilpancingo, Guerrero, México, correo electrónico: geowromero@gmail.com

** Cuerpo Académico UAGro-CA-93 Riesgos Naturales y Geotecnología, FI, Universidad Autónoma de Guerrero, correos electrónicos: rvazquez@uagro.mx, rnrmos@uagro.mx

removal processes allows to identify and effectively categorize the risk zone, in addition it was determined that the lithological, structural, topographic factors and the hydrometeorological events of September 2013, were the ones that caused the incidence of most recorded landslides.

Key words: *landslides, conditioning factors, triggering detonating factors, Aster, susceptibility index.*

Resumen

Los procesos de remoción en masa constituyen procesos geológicos recurrentes y representan una amenaza latente en el Estado de Guerrero, por su vínculo con eventos hidrometeorológicos extraordinarios. En varios estudios que caracterizan estos procesos, se aplican técnicas de percepción remota y la información se integra a través de los Sistemas de Información Geográfica. El modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, incluyó la interpretación de factores físicos que intervienen en dichos procesos, los cuales fueron caracterizados por distintos mapas temáticos. La generación final del modelo consistió en la acumulación final de los aportes individuales de cada factor (Recondo, 2000; Hervas y Barredo, 2001; Hervas, *et al.*, 2002), el cual representó una zonificación por índice de susceptibilidad; la corroboración de los datos se realizó a través de un inventario de deslizamientos, generado a través de interpretación de imágenes *on-line*, aplicando las herramientas de Google Earth. Los resultados indican que el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, permite identificar y categorizar efectivamente las zonas de riesgo, además se determinó que los factores litológicos, estructurales, topográficos y los eventos hidrometeorológicos de septiembre de 2013, fueron los que provocaron la incidencia de la mayoría de los deslizamientos registrados.

Palabras clave: *deslizamientos, factores condicionantes, factores detonantes, Aster, índice de susceptibilidad.*

Resumo

Os processos de remoção de massa constituem processos geológicos recorrentes e representam uma ameaça latente no Estado de Guerrero, por seu vínculo com eventos hidrometeorológicos extraordinários. Em vários estudos que caracterizam estes processos, se aplicam técnicas de sensoriamento remoto e a informação se integra através dos Sistemas de Informação Geográfica. O modelo de susceptibilidade a processos de remoção de massa, incluiu a interpretação de fatores físicos que intervêm nestes processos, os quais foram caracterizados por distintos mapas temáticos. A geração final do modelo consistiu na acumulação final dos aportes individuais de cada fator (Recondo, 2000; Hervas y Barredo, 2001; Hervas, *et al.*, 2002), que representou um zoneamento por índice de susceptibilidade; a corroboração dos dados se realizou através de um inventário de deslizamentos, gerado através de interpretação de imagens

on-line, aplicando as ferramentas de Google Earth. Os resultados indicam que o modelo de susceptibilidades a processos de remoção de massa, permite identificar e categorizar efetivamente as zonas de risco, além disso se determinou que os fatores litológicos, estruturais, topográficos e os eventos hidrometeorológicos de setembro de 2013, foram os que provocaram a incidência da maioria dos deslizamentos registrados.

Palavras chave: *deslizamentos, fatores condicionantes, fatores detonantes, Aster, índice de susceptibilidade.*

Introducción

El presente trabajo se deriva de un proyecto de investigación desarrollado por Romero-Rojas (2017). Los eventos catastróficos de tipo hidrometeorológico ocurridos en México se han presentado cada vez con mayor frecuencia, evidenciado la amenaza y vulnerabilidad de la población. El cambio climático, la deforestación y los factores antropogénicos ligados al crecimiento poblacional y al uso del suelo en condiciones poco favorables han sido parteaguas en el incremento en la incidencia de estos fenómenos (González de Vallejo, 2002). Entre los eventos catastróficos más recurrentes en México están los procesos de remoción en masa, los cuales se convierten en riesgo latente cuando ponen en peligro a la sociedad.

En el Estado de Guerrero, Zúñiga-Gutiérrez *et al.* (2016) describen procesos de tipo deslizamiento en la comunidad de El Balsamar, municipio de Leonardo Bravo, en el 2002; en Taxco de Alarcón en las colonias de Martelas, La Molina y La Cadena, en el 2010. Estos fenómenos están íntimamente ligados a la precipitación registrada en eventos hidrometeorológicos extraordinarios.

En el año 2013 ocurrieron importantes procesos de remoción de masa, causados por el paso de la depresión tropical núm.13 en el Pacífico, frente a costas de Guerrero, iniciando a 170 km al suroeste de Tecpan de Galeana; posteriormente se desarrolló la tormenta tropical “Manuel”, la cual propició entrada de humedad hacia el sur y occidente del país para pasar a la categoría de huracán. Simultáneamente se desarrolló en el Golfo el huracán “Ingrid”, afectando 29 estados del país (Bravo-Lujano, 2013). La lluvia registrada por estos fenómenos dieron lugar importantes deslizamientos, como el que ocurrió en La Pintada en Atoyac de Álvarez; donde se registraron 70 personas desaparecidas, 379 damnificados y 20 construcciones dañadas (Ramos-Bernal *et al.* 2015). Hubo también deslizamientos en las regiones de la montaña y centro del Estado, particularmente en los municipios de Leonardo Bravo y Chilpancingo.

Las herramientas integradoras para el análisis de los procesos de remoción en masa incluyen metodologías como la Percepción Remota, cuya función contribuye en el uso y manipulación de datos geográficos para la generación de modelos que, en

conjunto con análisis estadísticos, permiten evaluar y gestionar el efecto negativo de los fenómenos naturales en beneficio de la sociedad. Estudios de este tipo, incluyen herramientas de análisis geográfico, geológico, ecológico y de infraestructura, que con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta integradora, proveen de información oportuna y veraz que eventualmente puede servir en la toma de decisiones para establecer planes de prevención, atención o mitigación de riesgos naturales en escala regional.

Zona de estudio

Se localiza en la zona centro del Estado de Guerrero, entre los municipios de Chilpancingo de los Bravo, Leonardo Bravo, General Heliodoro Castillo y Coyuca de Benítez. Cubre una superficie de 128 646 ha y está dentro de la provincia fisiográfica conocida como Sierra Madre del Sur (Morán-Zenteno, 1984) en la subprovincia cordillera costera del sur (INEGI, 2015). Los principales poblados incluidos en la zona son Izotepec, Yextla, Cruz de Ocote, Chautipan, Alcaparrosa, Inscuinatoyac, Coacoyulillo y Jaleaca de Catalán (Figura. 1).

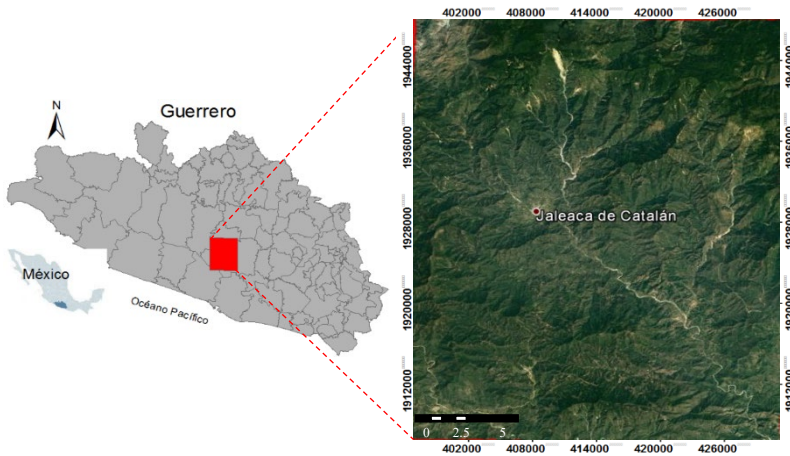


Figura 1. Zona de estudio.

Materiales y métodos

El trabajo contempla un análisis de cada uno de los factores que afectan la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, mediante la interpretación de cartas geológico-mineras, topográficas y edafológicas y procesamiento digital de imágenes satelitales a través de los softwares ArcGis y Dinamica EGO. Las fechas de las imágenes usadas fueron de un año previo y otra posterior a los eventos climatológicos

descritos, con la finalidad de identificar los procesos de remoción ocurridos por en el periodo.

Se integró un inventario de una muestra de deslizamientos, generado mediante herramientas de Google Earth que sirvieron como polígonos de entrenamiento y validación del modelo generado. Este proceso se realizó con la imagen del 12 de agosto de 2014, se identificaron y digitalizaron 70 polígonos con áreas mayores a 450 m² que equivalen a dos píxeles en las imágenes Aster.

Imágenes satelitales Aster

Las imágenes satelitales usadas corresponden al sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), de fechas 10 de diciembre de 2012 y 13 de diciembre de 2013. Las bandas de este sensor se conforman en tres subsistemas: el SWIR (región espectral del infrarrojo de onda corta); el TIR (región del infrarrojo térmico) y el VNIR (región espectral del infrarrojo cercano). Se eligieron las bandas 1, 2 y 3N cuya resolución espacial es de 15 metros.

Con estas imágenes se generó información adicional derivada, como los Índices de Vegetación, específicamente los NDVI (Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada) y los Componentes Principales para ambas fechas de las imágenes (Figura 2).

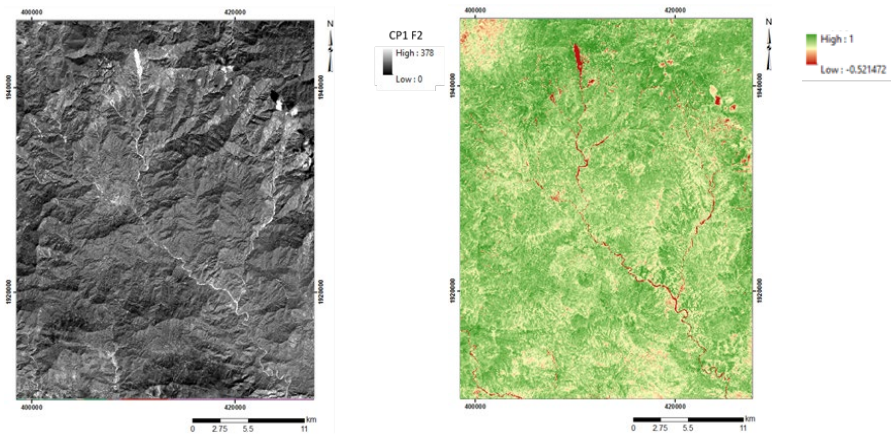


Figura 2. a) Componente Principal (CP). b) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de fecha 13 de diciembre de 2013.

Posteriormente, a través del método de Regresión Lineal aplicado a las imágenes de NDVI y CP entre ambas fechas, se generó un modelo de predicción para determinar las variaciones existentes con los valores reales correspondientes, en cuyos casos

los datos son expresados a través de mapas binarios categóricos (Romero-Rojas *et al.*, 2017). La comparación de la información resultante sirvió para integración de un mapa de deslizamientos previos. El cual se usó como uno de los insumos del modelo de susceptibilidad propuesto.

Mapas temáticos

La interpretación y caracterización de los factores que intervienen en los procesos de remoción en masa, fueron representados por distintos mapas temáticos que alimentaron al modelo de susceptibilidad. El proceso consistió en identificar las variables que involucraron factores físicos, como la geología regional, el relieve, la edafología y la precipitación. Inicialmente, se realizaron tres mapas base: el mapa geológico, el Modelo Digital de Elevación y el edafológico (Figuras 3 a, b, c); en el último caso, sólo se requirieron los metadatos de la clasificación textural para su procesamiento posterior.

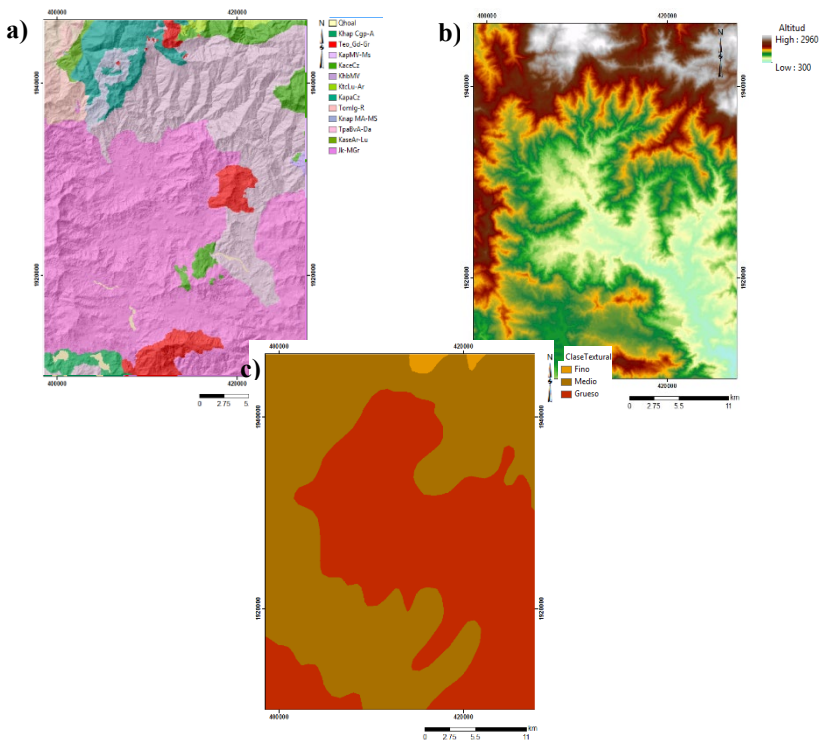


Figura 3. a) Mapa geológico, b) Modelo Digital de Elevación y c) Mapa edafológico (clasificación textural) del área de estudio.

A continuación se muestra el resumen de los mapas temáticos y sus mapas finales que se incorporaron al modelo de susceptibilidad (Figura 4).

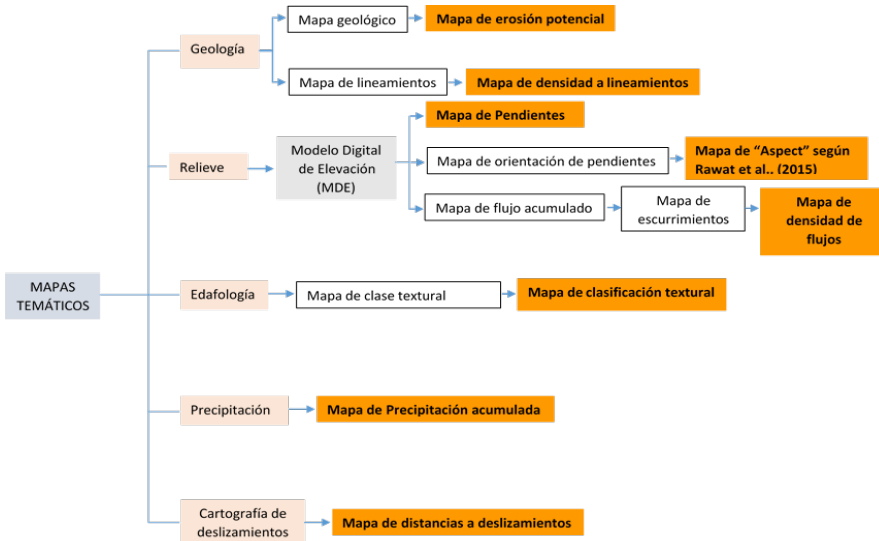


Figura 4. Resumen de mapas iniciales y su producto que servirán como insumos en el modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Modelo de susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa (PRM)

El modelo de susceptibilidad a PRM, consiste en el análisis de los factores causales de los PRM, evaluando para cada uno y pixel a pixel, su grado de aportación. Estas aportaciones individuales se acumulan en un índice global y de esta manera se integra la contribución relativa al peligro global por PRM que registra un área específica (Recondo, 2000; Hervás y Barredo, 2001; Hervás *et al.*; 2002).

Normalización de los mapas temáticos

Los mapas temáticos resultantes, representan las aportaciones individuales de cada uno de los factores considerados y registran valores tanto continuos como categóricos. Para hacer comparables las aportaciones, fue necesario normalizar la información estableciendo valores mínimos y máximos y así asignarle un valor normalizado a cada uno. Por conveniencia se definió que los mapas normalizados registraran valores entre 0 (aportación nula) ó 1 (aportación máxima.). El proceso de normalización para cada caso fue distinto, dependiendo del tipo de información que representan. Dicha normalización fue desarrollada con apoyo del software Dinamica EGO y se describen a continuación con mayor detalle.

Erosión potencial

Los valores finales del análisis de erosión potencial dieron como resultado un mapa categórico de cinco categorías de aportación (1-muy baja a 5-muy alta). Con estos datos se obtuvo la relación de cada clase respecto al valor máximo (5). Los valores normalizados representan el grado de aportación del factor de erosión potencial en el modelo global de susceptibilidad (Tabla 1).

Tabla 1
Valores de normalización del mapa de erosión potencial

<i>Clase</i>	<i>Normalización</i>	<i>Valores Normalizados</i>
1 (muy bajo)	1/5	0.2
2 (bajo)	2/5	0.4
3 (medio)	3/5	0.6
4 (alto)	4/5	0.8
5 (muy alto)	5/5	1

Densidad a lineamientos

El mapa de densidad a lineamientos tiene valores continuos dentro de un límite para este caso de 500 m, establecido de acuerdo al promedio de la distancia de lineamientos a deslizamientos previos, de forma que pixeles fuera de este límite no aportaran al índice de riesgo global en el modelo de susceptibilidad, en lo que corresponde al factor de lineamientos.

El rango de valores del mapa de densidad va de 0 a 0.00254663. Tomando el valor máximo como base para la normalización, a partir de la Ecuación 1 se obtienen la relación del valor de densidad de cualquier pixel respecto al valor máximo.

$$Pn_i = \frac{P_i}{V.M.} \quad (1)$$

Donde:

Pn_i : Pixel normalizado i

P_i : Densidad de lineamientos del pixel i

$V.M.$: Valor máximo (0.00254663)

El rango de valores resultantes en el mapa normalizado es de 0 a 0.700423 y éste es el mapa que será usado en el modelo de susceptibilidad.

Pendientes

Para la normalización se analizó el histograma de frecuencias de pendientes para generar un umbral con base a la media más el doble de la desviación estándar (Vázquez-

Jiménez, 2017) de los datos con el fin de identificar los valores más altos y tratarlos de la misma forma. La umbralización arrojó un valor final de 42°; de esta forma,

todos los pixeles iguales o mayores fueron considerados como máximos. Las Ecuaciones 2 a 4 sirvieron para normalizar las pendientes.

$$S_N = 0 \text{ Para los pixeles con pendientes } \leq 5^\circ \text{ (Alcántara-Ayala, 2000)} \quad (2)$$

$$S_N i = \frac{S(i)}{\mu + 2\sigma} = \text{Los pixeles con pendientes } > 5^\circ \text{ y } \leq 42^\circ \quad (3)$$

$$S_N i = 1 \text{ Para los pixeles con pendientes } > 42^\circ \quad (4)$$

Donde:

$S_N i$: Pendiente normalizada para el pixel i

$S i$: Valor de la pendiente original para el pixel i

μ : Media de las pendientes

σ : Desviación estándar de las pendientes

Orientación de las pendientes

Se identificaron las clases con mayor incidencia de deslizamientos de acuerdo al inventario; siguiendo la propuesta de Rawat *et al.* (2015); se categorizaron las orientaciones en ocho clases de orientaciones y para cada una se determinó el grado de susceptibilidad en función de la frecuencia de pixeles en el inventario. Finalmente, se reasignaron las clases con base al grado de susceptibilidad, donde el número uno corresponde al grado “bajo” y el número ocho al grado “muy alto”.

Una vez asignadas las nuevas categorías; la normalización, consistió calcular la relación de cada clase respecto el valor mayor (8) de forma similar al caso de lineamientos.

Densidad a flujos

El mapa de densidad a flujos presenta valores continuos al igual que el mapa de lineamientos. Siguiendo la propuesta de Wang *et al.* (2017), el límite de influencia de flujos se estableció en 200 m. El mapa original contiene valores desde 0 hasta 0.012571. El proceso de normalización se obtuvo a partir de la relación del valor de la densidad de cada pixel y el valor máximo registrado (veáse Ecuación 1). De esta forma, el mapa de densidad de flujos normalizado registra valores entre 0 y 0.877316.

Efecto Potencial de la Precipitación (EPP)

En el diseño del modelo se identificaron factores inherentes que requirieron ser combinados, con este argumento se procedió a construir un mapa que involucra a tres de los mapas temáticos: clase textural, pendientes (sin normalizar) y precipitación. En

este sentido, se propuso la generación de un mapa que represente el efecto potencial de la precipitación combinando para cada pixel los valores de pendiente y la textura del suelo, calculado a partir de la Ecuación 5.

$$EPP_i = P_i * CT_i * S_i \quad (5)$$

Donde:

EPP_i : Efecto Potencial de la Precipitación para el pixel i

P_i : Precipitación Acumulada

CT_i : Clase Textural

S_i : Pendiente

El mapa resultante se normalizó de la forma en que ha sido explicado y el mapa final registra valores entre 0 y 0.876719.

Modelo de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa

De acuerdo con trabajos previos (Recondo, 2000; Hervas y Barredo, 2001; Hervas *et al.*, 2002), la generación del modelo de susceptibilidad consistió en la acumulación pixel a pixel de la aportación individual de cada uno de los factores considerados expresados espacialmente a través de los mapas normalizados. De esta forma, el valor acumulado de las aportaciones individuales de cada factor representará el Índice de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa (ISPRM) y pueden ser expresados con la ecuación 6.

$$ISPRM = EP_N + DL_N + S_N + OS_N + DF_N + EPP_N \quad (6)$$

Donde:

ISPRM: Índice de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa

EP_N : Erosión Potencial Normalizada

DL_N : Densidad a Lineamientos Normalizada

S_N : Pendiente Normalizada

OS_N : Orientación de las Pendientes (Aspect) normalizada

DF_N : Densidad a Flujos Normalizada

EPP_N : Efecto Potencial de la Precipitación Normalizada

El mapa resultante muestra valores entre 0.250 y 4.796 y fue categorizado en función del histograma, como se muestra en la tabla (Tabla 2):

Tabla 2
Rango de valore para ISPRM y su categoría correspondiente

No.	Rango ISPRM	Categoría
1	0.250-1.159	Muy bajo
2	1.159-1.690	Bajo
3	1.694-2.175	Medio
4	2.175-2.710	Alto
5	2.710-4.796	Muy alto

Efecto de los remanentes de procesos de remoción antiguos

Se desarrolló un análisis adicional, considerando como un factor condicionante más, la cercanía de los pixeles estables a deslizamientos antiguos. Para ello se obtuvo un mapa de distancias entre los pixeles sin procesos de remoción y zonas con la presencia de ellos. Dicho mapa resulta con valores mínimos de 15 metros (por la resolución espacial de las imágenes), siendo estos los pixeles inmediatos a zonas deslizadas y por ello los más susceptibles a la ocurrencia de nuevos procesos.

De acuerdo a este análisis y con el fin de normalizar el mapa de distancias con valores entre 0 y 1, para incorporarlo al modelo de ISPRM y explorar su efecto, se aplicó la Ecuación 7.

$$DNi = \frac{RE}{Di} \tag{7}$$

Donde:

DNi: Distancia Normalizada del pixel *i*

RE: Resolución espacial (15 m)

Di: Distancia a un deslizamiento del pixel *i*

Una vez obtenidos los valores normalizados correspondientes a cada pixel, se ajustó a la ecuación inicial del modelo (5) incorporando la distancia a deslizamientos, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$ISPRM = EP_N + DL_N + S_N + OS_N + DF_N + EPP_N + DN_N \tag{8}$$

Donde:

ISPRM: Índice de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa

EP_N: Erosión Potencial Normalizada

DL_N: Densidad a Lineamientos Normalizada

S_N: Pendiente Normalizada

OS_N: Orientación de las Pendientes (Aspect) normalizada

DF_N: Densidad a Flujos Normalizada

EPP_N: Efecto Potencial de la Precipitación Normalizada

DN_N: Distancia Normalizada a Deslizamientos antiguos

Evaluación del modelo de susceptibilidad y su relación con las localidades del área de estudio

Como evaluación final del modelo resultante, se generó una traslape de los polígonos correspondientes a las poblaciones de la zona y para explorar su relación con las zonas susceptibles a los procesos de remoción en masa, con la finalidad de identificar zonas potenciales de riesgo a sufrir algún proceso de remoción que represente una amenaza a la población.

Resultados

Mapa de erosión potencial

Hacia la parte centro-sur del área de estudio se aprecia una erosión potencial ‘muy baja’ seguido por el grado ‘medio’ y ‘bajo’ hacia la parte centro-norte, evidenciando que la escorrentía superficial en condiciones normales no afecta directamente el comportamiento mecánico de las rocas (Figura 5a).

De acuerdo al inventario, los principales deslizamientos se presentaron en formaciones que exhiben filitas, metaandesitas, pizarras, rocas volcánicas intemperizadas, calizas y lutitas, lo que evidencia que las características físicas superficiales de las rocas presentan fracturamiento, planos de foliación dominantes o estratificación, intemperismo y contacto litológico de las unidades, lo que influenciaron a la inestabilidad del terreno aunado a otros factores superficiales propicios para la generación de PRM.

Mapa de densidad a lineamientos

En el mapa se observan lineamientos únicos y otros interceptados hasta ocho veces con mayor incidencia al oeste de la zona. De acuerdo al inventario, puede observarse que la mayoría de los PRM son atravesados por, o están dentro del rango asignado como zona de material vulnerable, específicamente hacia la parte noreste (Figura 5b).

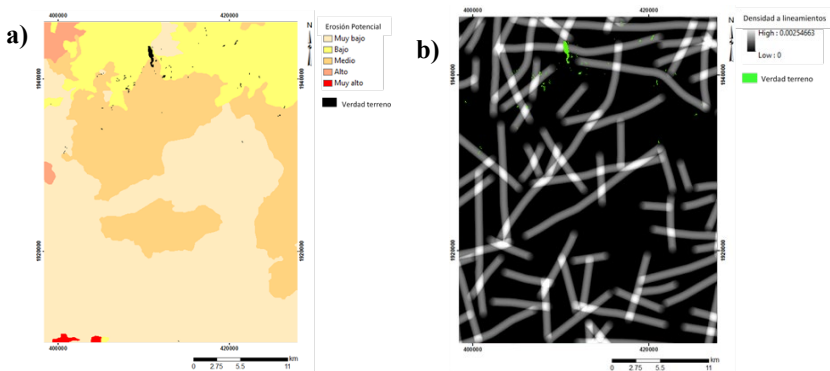


Figura 5. Mapas temáticos finales: a) Erosión potencial y b) Densidad a lineamientos.

Mapa de pendientes

El análisis realizado con los polígonos del inventario indican que la mayoría de ellos se distribuyen en las pendientes que oscilan entre los 25° y 33°, lo cual indica que las zonas con pendientes similares pueden ser susceptibles a PRM (Figura 6a).

Mapa de orientación de las pendientes

De acuerdo al inventario, se observa que los deslizamientos se presentaron en laderas orientadas al sureste, sur y suroeste, lo cual indica que los PRM no solo están controlados por la orientación de los flancos de las geoformas sino que podrían incluirse la intensa foliación y la litología presente en la zona (Figura 6b).

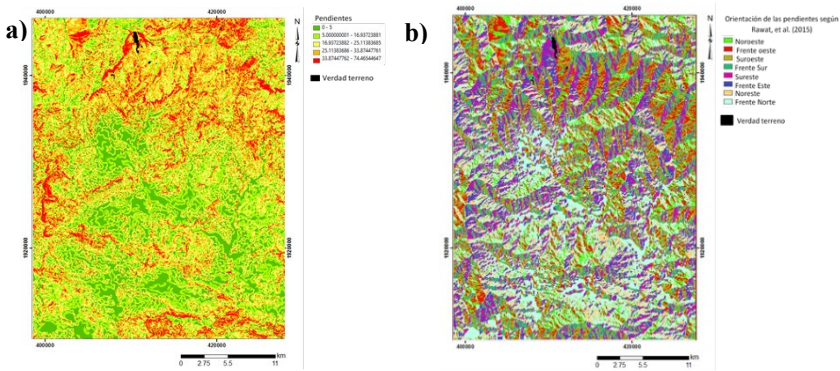


Figura 6. Mapas temáticos finales: a) Pendientes y b) Orientación de las pendientes.

Mapa de densidad a flujos

Los flujos presentan continuidad con la distribución de los rasgos estructurales de la zona. Según el inventario, en los lugares de deslizamientos se observan uniones de cauces principales y secundarios o cercanía a ellos. Con esto, la distribución espacial de los flujos y en conjunto con factores externos condicionan la generación de PRM en la zona de estudio (Figura 7a).

Mapa de clasificación textural

Según este mapa, el material posee alta capacidad de filtración. Los polígonos del inventario se encuentran distribuidos en las zonas de clases media y alta. Al existir diferencia textural entre materiales adyacentes y una escorrentía superficial que se infiltra, el material se vuelve inestable, afectando no solo a la zona de transición sino que también vulnera el material circundante (Figura 7b).

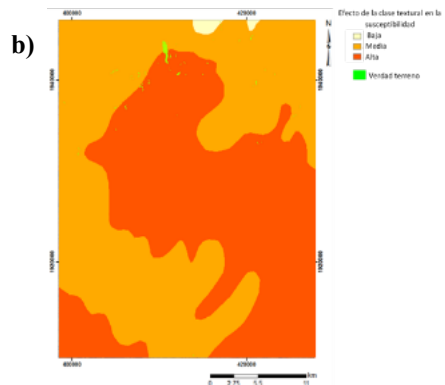
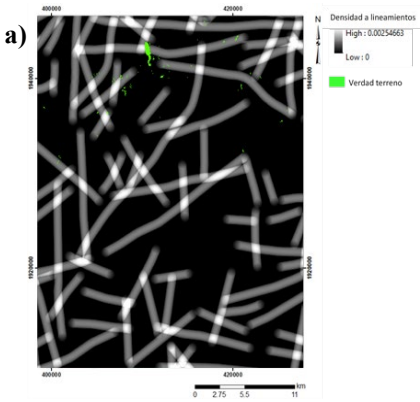


Figura 7. Mapas temáticos finales: a) Densidad a lineamientos y b) Clasificación textural.

Figura 25. Mapa de clase textural

Mapa de precipitación acumulada

Según este mapa, la menor precipitación se localizó al noroeste y sur; mientras que la mayor precipitación se dio al Noreste, esto debido a la presencia de la serranía sur, lo que favorece una mayor cantidad de precipitación debido al ascenso y enfriamiento adiabático del aire por la presencia de vientos húmedos (García-Amaro de Miranda, 2003).

La distribución de los polígonos del inventario se encuentran entre los valores medios-altos de precipitaciones, lo cual indica alta influencia de este factor para la ocurrencia de los PRM (Figura 8).

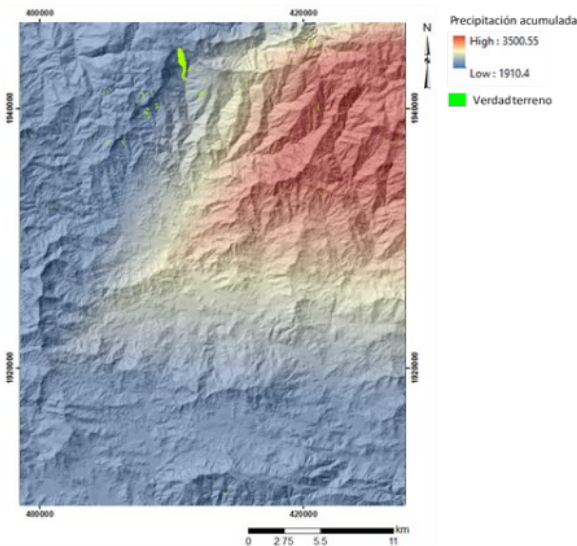


Figura 8. Mapa temático final de Precipitación acumulada.

Mapa de distancia a deslizamientos

Los mapas categóricos resultantes del proceso de detección de cambios a partir de las imágenes del proceso de detección de cambios a partir de las imágenes NDVI y CP1 indican que el mapa de deslizamientos generado con los datos NDVI tiene mayor índice de aciertos y menor índice de errores, con un índice global de concordancia Kappa de 86%. Por otro lado, el mapa de deslizamientos generado con datos de CP1, presenta un índice Kappa de 80.6%.

En la Figura 8e y 8f, es posible observar a detalle las diferencias en la delimitación automática de los deslizamientos aplicando la Regresión Lineal, para ambos tipos de datos (NDVI y CP1). Además se observa una mayor cobertura los polígonos detectados como deslizamientos usando NDVI (en amarillo en las Figuras 9d, 9e y 9f) respecto a los polígonos detectados como deslizamientos usando CP1 (en verde en Figuras 9a, 9b y 9c).

En las zonas de traslape con los polígonos del inventario (Figuras 9c y 9f) se observa en general que ambos resultados corresponden con los polígonos del inventario. Sin embargo, los deslizamientos detectados usando imágenes NDVI presentan visualmente mayor precisión en el ajuste de los bordes de los deslizamientos detectados.

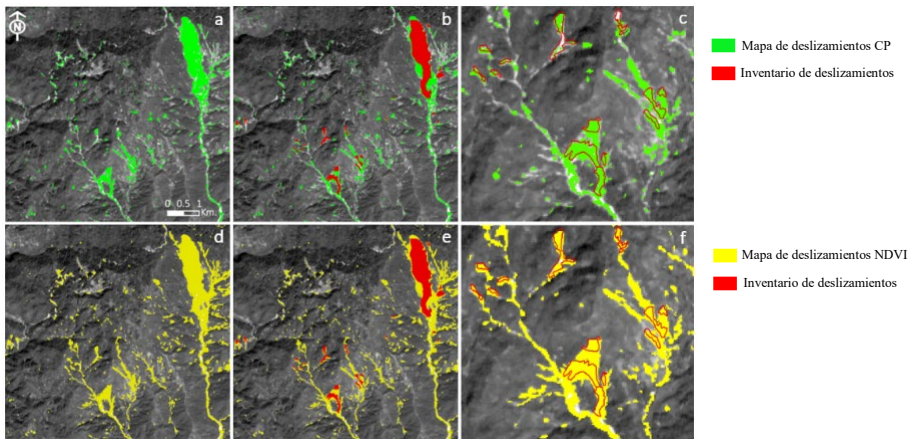


Figura 9. Acercamiento a zonas de los mapas de deslizamientos generados a partir de datos CP-verde y NDVI-amarillo (a y d). Traslape de inventario de deslizamientos en rojo sobre deslizamientos detectados por el modelo (b y e). Traslape de inventario de deslizamientos (c y f).

Modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa

Según la información de los pixeles, las categorías de susceptibilidad media y baja son predominantes en el área de estudio y se localizan en la región centro-sur. Las

rocas presentes corresponden en menor superficie a filitas, metaandesitas y pizarras hacia la parte este y suroeste; gneises y granitos milonitizados, estas últimas hacia la parte central y representan mayor extensión de área (Figura 10).

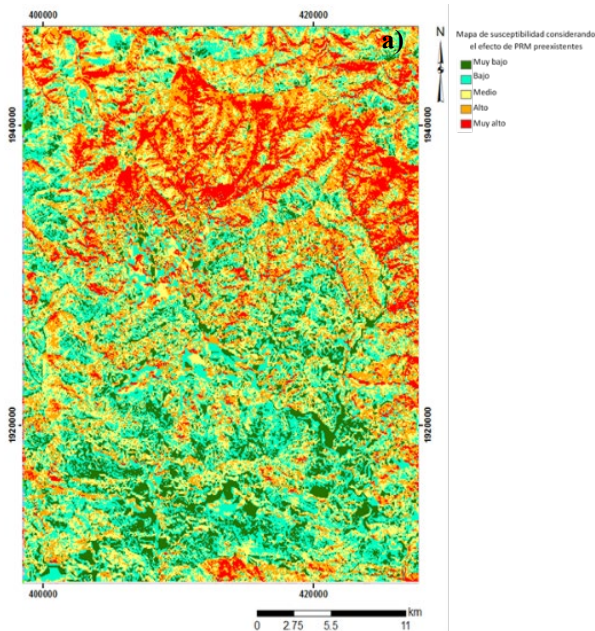


Figura 10. Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (PRM).

Las rocas graníticas presentan mayor resistencia a procesos de meteorización e impermeabilidad a procesos hidrológicos, por tanto, son poco susceptibles a erosión por escorrentía superficial, lo que limita la presencia de PRM.

Las zonas de susceptibilidad alta y muy alta están al norte y noreste, donde existen pendientes pronunciadas y unidades litológicas poco competentes, como metaandesitas, filitas y pizarras y al este hay afloramientos de brechas y rocas volcánicas. La mayoría de las rocas muestran contenido de micas las cuales en estado de meteorización producen suelos ricos en arcillas con gran capacidad de retención de agua y baja resistencia mecánica (Alcántara-Ayala, 2000), tal es el caso de las filitas y pizarras cuya extensión es predominante en las áreas de susceptibilidad alta y muy alta.

Las áreas hacia el sur con susceptibilidad alta, se relacionan con rocas competentes a la erosión y escorrentía superficial, pero están en una zona de contacto litológico, lo cual debilita la roca, además se observa una transición en el grado textural de medio a alto. La clasificación textural juega un papel importante debido a la presencia

de rocas permeables, es decir, con espacios intersticiales capaces filtrar el agua a diferencia de material fino.

Los rasgos estructurales muestran una relación importante con las zonas de alta y muy alta susceptibilidad, los lineamientos que atraviesan estas zonas contienen más de una intersección con otros lineamientos; asimismo los flujos presentes muestran influencia de los valores más altos hacia las zonas de alta y muy alta susceptibilidad, además de que forman parte de la escorrentía superficial.

Además de lo anterior, la precipitación acumulada en esas fechas jugó un rol importante en los procesos de remoción, ya que en estas zonas se registró la mayor concentración pluvial con valores que oscilan entre los 2000 mm y 3500.55 mm, esta última la de mayor precipitación histórica registrada en la zona

Las zonas con mayor potencial a PRM, pueden ser corroborados a través de la ubicación espacial de los polígonos del inventario de deslizamientos (verdad terreno). Se aprecia su distribución hacia las zonas con los valores de mayor susceptibilidad, asimismo el deslizamiento de mayor tamaño es ejemplo de un proceso de remoción que cumple con la presencia de los factores condicionantes y detonantes para su generación: presencia de roca poco coherente, fracturada y foliación en distintas direcciones, con una pendiente pronunciada mayor a 33° , interacción de un flujo que atraviesa longitudinalmente el área con aportación de agua significativo. La parte estructural indica que la orientación de uno de los lineamientos cruza perpendicularmente al deslizamiento, lo cual es un factor importante en el desarrollo del movimiento.

Los valores resultantes al incluir como factor a los deslizamientos previos, indican que la existencia de remanentes de PRM influye e incrementa la susceptibilidad, ya que el material no se encuentra estable y las condiciones físicas y mecánicas no son iguales al momento de su depósito. Inicialmente, los polígonos del inventario se veían comprometidos en las áreas de muy alta susceptibilidad, pero sus contornos no, además de que ocasionalmente se encontraban en áreas de susceptibilidad menores (Figuras 11a y b). En el modelo de susceptibilidad que involucra antiguos deslizamientos, se aprecia un cambio importante en la distribución espacial de los polígonos, ya que los incluye directamente con las áreas de mayor susceptibilidad, lo que evidencia un mayor control de las áreas propensas a PRM (Figuras. 11c y d).

Según esto, es importante la incorporación de los PRM preexistentes, al hacerlo se están considerando variables que pudiesen omitirse en el modelo inicial, por tanto, asume una mejora considerable en la detección de zonas vulnerables a procesos de remoción en masa.

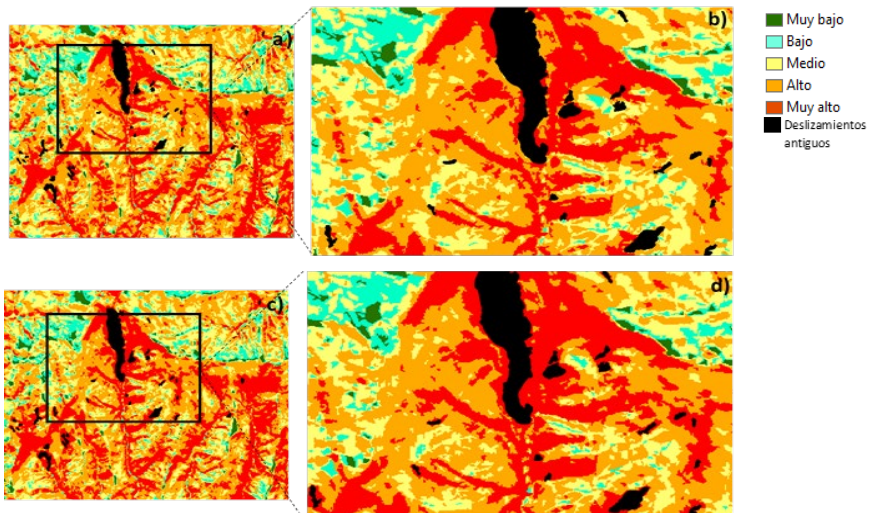


Figura 11. Comparativos del modelo de susceptibilidad inicial (a), el modelo con PRM preexistentes (c). Se incluyen polígonos de deslizamientos (en color negro).

Evaluación del modelo de susceptibilidad y su relación con las localidades del área de estudio

Se localizan nueve poblados dentro del área de estudio, de los cuales Ixotepec, Yextla, Colorada y Jaleaca de Catalán representan las localidades de mayor población con un total de 6 970 habitantes (SEDESOL, 2013). Según el modelo de susceptibilidad que involucra a los deslizamientos antiguos, las tres clases de mayor riesgo (medio, alto y muy alto) se encuentran presentes en estas zonas, predominantemente la clase de susceptibilidad media y alta en los poblados de Ixotepec y Yextla; mientras que en la porción centro-sur, la clase predominante es la media y alta en los poblados de Jaleaca y Colorada (Figura 12). Es importante recalcar la importancia del impacto de los resultados de este trabajo, las posibles consecuencias directas en los asentamientos y el futuro planeamiento territorial.

Conclusiones

La aplicación de herramientas geotecnológicas, permitió el análisis de los factores (condicionantes y detonantes) considerados como el modelo de susceptibilidad y la representación de sus valores expresados espacialmente.

El desarrollo del modelo de susceptibilidad a procesos de remoción en masa aplicando técnicas de Percepción Remota y SIG, permitió identificar las zonas susceptibles de acuerdo a los valores de los factores detonantes y condicionantes y a los

procesos de remoción anteriores; siendo el tipo de roca, específicamente filitas, pizarras, lavas, brechas y las discontinuidades inherentes a ellas, es decir, intensa foliación y clase textural; los lineamientos, las pendientes de las laderas y la precipitación acumulada asociada a los eventos hidrometeorológicos extraordinarios registrados en 2013, los principales factores que provocaron la incidencia de los deslizamientos en la zona de estudio.

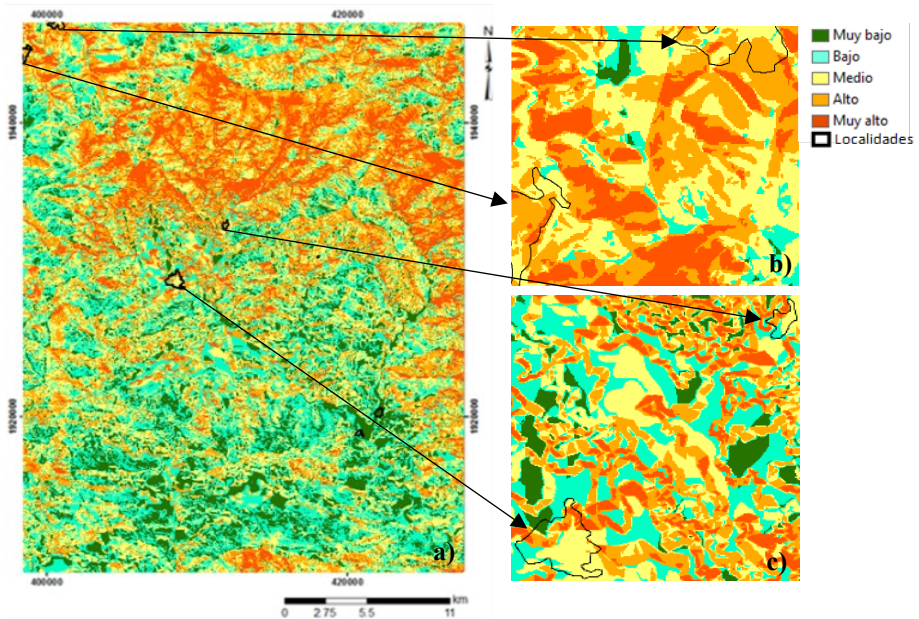


Figura 12. Poblados del área de estudio y su relación con las clases susceptibilidad. a) Modelo de susceptibilidad; b) Poblados de Yextla (polígono sup. der.) e Izotepec (polígono inf. izq.); c) Poblados de Colorada (polígono sup. der.) y Colorada (polígono inf. izq.).

Estudios como el presente, puede apoyar a distintas instituciones encargadas de salvaguardar a la población en eventos de este tipo, localizando las zonas donde se registra una mayor susceptibilidad de acuerdo a los factores considerados e integrando planes de atención o prevención a desastres considerando zonas con mayor prioridad que otras. Es importante mencionar también que esta investigación, puede complementarse aún más con la definición de rutas de evacuación, identificación de centros de atención y capacidad de albergues, etc.; todo ello poniendo como eje fundamental el conocimiento del territorio a través de la aplicación de las tecnologías de la información geográfica.

Bibliografía

- Alcántara-Ayala, I. (2000). “Índice de susceptibilidad a movimientos de terreno y su aplicación en una región semiárida”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 17, núm. 1, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 66-74.
- Bravo-Lujano, C., (2013). “Reseña del huracán ‘Manuel’ del Océano Pacífico. CONAGUA-SMN”, 9 pp. Disponible en: <<http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2013-Manuel.pdf>>, consultado el 10 de noviembre de 2016.
- García-Amaro de Miranda, E. (2003). “Distribución de la precipitación en la República Mexicana”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto del Instituto de Geografía*, núm. 50, UNAM, pp. 67-76. Disponible en: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n50/n50a9.pdf>>, consultado el 3 de noviembre de 2017.
- González de Vallejo, L.I., (2002). *Ingeniería Geológica*, PEARSON, Educación, Madrid, 774 pp.
- Hervas, J; Barredo-Cano, J.I. y Lomoschitz, A.; (2002). “Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso de conjunto de SIG Teledetección y Métodos de Evaluación Multicriterio. Aplicación a la Depresión de Tirajana (Gran Canaria)”.
- Hervas, J. y Barredo, J.I. (2001). “Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso de conjunto de SIG Teledetección y Métodos de Evaluación Multicriterio. Aplicación de Tirajana (Gran Canaria)”.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2015). *Panorama sociodemográfico de Guerrero*, INEGI, 95 pp.
- Morán-Zenteno, D. (1984). *Geología de la República Mexicana. Secretaría de Programación y Presupuesto*, INEGI, 82 pp.
- Ramos-Bernal, R.N.; Vázquez-Jiménez, R.; Romero-Calcerrada, R.; Novillo, C.J.; Arrogante-Funes, P. y Sánchez-Tizapa, S. (2015). “Identificación de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del Estado de Guerrero, México”, *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, Universidad de Zaragoza-AGE, España, pp. 827-834.
- Rawat, M.S.; Uniyal, D.P.; Dobhal, R.; Varun, J.; Rawat, B.S.; Bartwal, A.; Devendra, S. and Ashok, A. (2015). “Study of landslide hazard zonation in Mandakini Valley, Rudraprayag district, Uttarakhand using remote sensing and GIS”, *Current Science*, vol. 109, núm. 1, pp. 158-170.
- Recondo, C. (2000). “Estudio de las zonas propensas a sufrir deslizamientos en los Concejos de Oviedo y Mieres (Asturias) a partir de una imagen Landsat-TM y de un Modelo Digital de Elevaciones”, *Revista de Teledetección*, vol. 14.

- Romero-Rojas, W.; Ramos-Bernal, R.N.; Vázquez-Jiménez, R.; Arrogante-Funes, P. y Arroyo-Matus, R. (2017). “Detección de deslizamientos de laderas por el método de regresión lineal utilizando imágenes Aster en la zona centro del estado de Guerrero, México”, XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles: Naturaleza, Territorio y Ciudad en un Mundo Global, Madrid España, 25-27 de octubre de 2017, pp. 363-372. DOI: <http://doi.org/10.15366/ntc.2017>.
- SEDESOL (2013). *Catálogo de localidades*. Disponible en: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=12&mun=040>, consultado el 26 de octubre de 2018.
- Vázquez-Jiménez, R. (2017). “Método alternativo para la elaboración de cartografía consistente de ocupación y uso del suelo, orientado a estudios de dinámica territorial”, tesis de doctorado, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España, 297 pp.
- Wang, F.; Xu, P.; Wang, C.; Wang, N. y Jiang N. (2017). “Application of a GIS-based slope unit method for landslide susceptibility mapping along the Longzi River, southeastern Tibetan Plateau”, *International Journal of Geo-Information*, China, 20 pp. Disponible en: <http://www.mpdi.com/journal/ijgi6060172>, consultado el 19 de junio de 2017.
- Zúñiga-Gutiérrez, M.; Cuevas-Sandoval, A.; Sánchez-Calvo, M. y Barragán-Trinidad, R. (2016). “Análisis de la amenaza de riesgo por deslizamiento de laderas en la ciudad de Chilpancingo, Guerrero”, *Foro de estudios sobre Guerrero*, vol. 2, núm. 3 224-243 pp.

Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite

Carlos González-Luna^{*,**}
Anatoliy Filonov^{*}
Omar Mireles^{*,**}
Iryna Tereshchenko^{*}

Recibido 8 de septiembre de 2018; aceptado 7 de noviembre de 2018

Abstract

Thanks to colorimetric techniques and unsupervised classification methods, can be vectorized and plotted the pollutants discharged evolution in the sea with respect to time and Landsat space, which, in practice, lowers the cost of research and allows for greater spatio-temporal coverage. This paper presents the case study of Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, Mexico, where the detritus discharge by the Ameca River was studied in the period 2006-2014 through a combined product of LandSat and Modis images and with the analysis of the spectral signatures of the different bands that present these satellites, the percentages of the dissolved organic matter in the feathers are inferred.

Key words: *remote sensing, debris, non-supervised classification, colorimetry, landsat, modis.*

Resumen

Gracias a técnicas de colorimetría y métodos de clasificación no supervisada, pueden ser vectorizada y trazada la evolución de contaminantes vertidos en el mar con respecto al tiempo y al espacio, lo que, en la práctica, abarata el costo de investigación

* Maestría en Ciencias en Hidrometeorología, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara, Blvd. Gral. Marcelino García Barragán 1421, Olímpica, 44430, Guadalajara, Jalisco, México, correo electrónico: geocarlosdeluna@gmail.com

** Escuela Militar de Especialistas de la Fuerza Aérea, Avenida Aviación s/n, Jardines de Nuevo México, 45200, Zapopan, Jalisco, México.

y permite tener una mayor cobertura espacio-temporal. Este trabajo presenta el caso de estudio de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, México, donde se estudió el vertido de detritos por el río Ameca en el periodo 2006-2014 a través de un producto combinado de imágenes LandSat y Modis y con el análisis de las firmas espectrales de las diferentes bandas que presentan estos satélites se infiere los porcentajes de la materia orgánica disuelta en las plumas.

Palabras clave: *percepción remota, detritos, clasificación no supervisada, colorimetría, landsat, modis.*

Resumo

Graças a técnicas de colorimetria e métodos de classificação não supervisionados, podem ser vetorizada e observada a evolução de contaminantes descargas no mar com respeito ao tempo e ao espaço, o que na prática, reduz o custo de investigação e permite ter uma maior cobertura espaço-temporal. Este trabalho apresenta o caso de estudo de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, México, onde se estudou a descarga de detritos no rio Ameca no período 2006-2014 através de um produto combinado de imagens LandSat e Modis e, com a análise das assinaturas espectrais das diferentes bandas que apresentam estes satélites, se infere os percentuais da matéria orgânica dissolvida nas plumas.

Palavras chave: *percepção remota, detritos, classificação não supervisionada, colorimetria, landsat, modis.*

Introducción

El Río Ameca es uno de los escurrimientos más importantes que desemboca en la Bahía de Banderas, su cuenca tiene una extensión territorial de 12 214 km² y una precipitación normal anual en el periodo 1971-2000 de 1 020 mm (INEGI, 2004). Su escurrimiento natural medio superficial total es de 2 235 hm³/año (Comisión Nacional del Agua-CNA).

Las aguas de este escurrimiento contienen residuos provenientes del lavado continental (rocas, sedimentos, materia orgánica, entre otros) y con base a lo observado en las imágenes de satélite, estos residuos se esparcen al llegar a la bahía formando las plumas de detritos suspendidos (agua turbia) donde el comportamiento y concentración de estas partículas suspendidas varía en todo el año y su tamaño está relacionado con el periodo de lluvias.

La concentración del total de contaminantes y sedimentos suspendidos provenientes del lavado continental y materia orgánica (detritos), constituye uno de los parámetros de calidad de agua más importantes (Rodríguez-Guzmán *et al.*, 2009),

principalmente por estar relacionados a la producción y flujo de metales pesados y microcontaminantes (Ekercin, 2007).

Estos sedimentos consisten en partículas suficientemente finas para ser transportadas en suspensión por el agua en movimiento (Campbell, 2007), como lo son la arcilla, el limo y la arena (Miller *et al.*, 2004). Además de afectar la calidad del agua, los detritos son indicativo de problemas de erosión en las cuencas hidrográficas. Más aún, el estudio de esta materia, principalmente en regiones costeras, tiene una gran importancia ecológica ya que las altas concentraciones de detritos en zonas costeras pueden afectar la productividad del fitoplancton y de la vegetación acuática sumergida, el crecimiento de corales, la dinámica de nutrientes, y el transporte de contaminantes y otros materiales (Miller *et al.*, 2004).

Derivado a las problemáticas anteriores es indispensable contar con un análisis de la dinámica de dispersión de los residuos en la Bahía de Banderas que funcione también como un insumo a los tomadores de decisiones en el ámbito social, turístico y medio ambiental.

Existen varias vías para estudiar la dispersión espacial de las plumas de detritos en los cuerpos de agua: Modelos numéricos, mediciones in situ, Teledetección (Geomática), entre otros. En este artículo se aborda la problemática mediante técnicas de Geomática que en términos generales es la detección a distancia (percepción remota) de las características y cambios que se producen en la superficie de la Tierra.

La identificación de éstas plumas, las variaciones en su extensión, patrones de dispersión y sus tasas de mezcla con aguas oceánicas es crítica en todos los aspectos de la oceanografía regional y de la plataforma continental (Lohrenz *et al.*, 1990).

La teledetección ha demostrado tener un potencial elevado en el monitoreo y seguimiento de fenómenos como la dispersión de residuos y contaminantes. La percepción remota de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia y que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre (Romero, 2006).

Por lo anterior, para este trabajo de tesis, se analizó el comportamiento de la dinámica superficial y dispersión de los detritos vertidos por el Río Ameca en la Bahía de Banderas mediante técnicas de percepción remota utilizando un producto combinado de imágenes LANSAT y MODIS en el periodo 2006-2014.

Área de estudio

El área de estudio es la Bahía de Banderas, la cual se localiza en la costa occidental de México (Figura 1) y constituye el límite sur del Golfo de California en su parte continental, abarcando parte de los estados de Jalisco y Nayarit. Geográficamente, la bahía está ubicada entre los 20° 25' y 20° 47' de latitud norte y los 105° 41' y 105° 25' de longitud oeste (Figura 2).



Figura 1. Ubicación de la Bahía de Banderas, México.

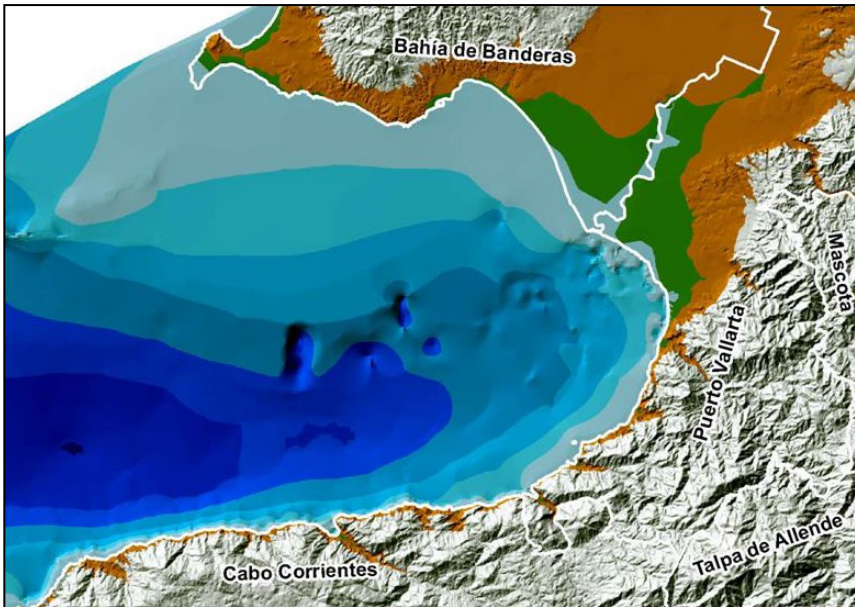


Figura 2. Situación geográfica de la Bahía de Banderas, México.

Materiales y métodos

La presente investigación se realizó con la finalidad de abundar y documentar una metodología sobre la aplicación de la teledetección a problemáticas oceanográficas y costeras. En este sentido, y debido a la problemática de residuos suspendidos que presenta la Bahía de Banderas se documentó la serie de tratamientos necesarios tanto para extraer de cada imagen satelital la porción de la bahía con detritos suspendidos como para registrar su firma espectral con la intención de que la metodología sea reproducible en otros océanos del planeta.

Para el procesamiento y análisis de la información que se aborda en este artículo, se utilizó el software de ArcGis empleando el módulo de Raster Processing y Multivariate. Se analizaron un total de 194 imágenes de satélites, 85 del satélite Modis y 109 del satélite Landsat. De las 109 imágenes Landsat, 6 corresponden a Landsat 5, 84 a Landsat 7 y 19 a Landsat 8.

Para la identificación de los sedimentos suspendidos en la Bahía se utilizó el método de clasificación no supervisada y validación visual por cada imagen ya que por motivo de tiempos no fue posible realizar una corrección radiométrica completa que estandarizara a todas las escenas. En compensación a lo anterior, se empleó la parcela de control en donde se observa la variación radiométrica entre los distintos sensores con el objetivo de ajustar los rangos de las categorías (con apoyo de la validación visual) para cada sensor y garantizar que sean comparables.

También, se tomaron muestras espectrales de distinta coberturas conocidas que no presenten cambio en el tiempo en las distintas escenas de un mismo sensor para ajustar o escalar los números digitales (ND). Finalmente se realizaron estadísticas para cada categoría y sensor en donde se observa que el rango de cada categoría se mantiene (Tablas 1 y 2).

Tabla 1
Variación de los promedios en ND por categoría y banda del sensor Modis

CATEGORIA	MODIS			
	BANDA	Promedio General	Promedio Inferior	Promedio superior
1	Rojo	25.36	18.08	32.65
	Verde	40.51	32.73	48.30
	Azul	36.72	30.05	43.39
2	Rojo	44.01	34.38	53.64
	Verde	58.01	49.10	66.92
	Azul	48.30	40.34	56.26
3	Rojo	83.49	57.51	109.46
	Verde	83.72	66.89	100.54
	Azul	60.00	46.76	73.24

Tabla 2
Variación de los promedios en ND por categoría y
banda de los sensores Landsat 5, 7 y 8

CATEGORIA	BANDA	LANDSAT 5			LANDSAT 7			LANDSAT 8		
		Promedio General	Promedio Inferior	Promedio superior	Promedio General	Promedio Inferior	Promedio superior	Promedio General	Promedio Inferior	Promedio superior
1	Infrarrojo Cercano	12.92	10.83	15.00	14.00	12.72	15.28	5,861.76	5,664.71	6,058.82
	Rojo	21.08	18.67	23.50	32.77	28.65	36.90	6,852.94	6,476.47	7,229.41
	Verde	21.08	18.17	24.00	47.71	43.26	52.16	8,032.35	7,617.65	8,447.06
2	Infrarrojo Cercano	16.50	14.50	18.50	16.34	14.71	17.97	6,685.71	6,264.29	7,107.14
	Rojo	26.13	23.75	28.50	42.18	36.70	47.67	8,242.86	7,514.29	8,971.43
	Verde	31.38	27.75	35.00	57.43	51.85	63.01	9,196.43	8,714.29	9,678.57
3	Infrarrojo Cercano	22.17	18.33	26.00	23.41	17.32	29.50	8,131.25	7,237.50	9,025.00
	Rojo	39.33	34.33	44.33	68.73	53.14	84.32	10,212.50	9,712.50	10,712.50
	Verde	42.50	38.33	46.67	77.36	67.75	86.96	10,362.50	10,050.00	10,675.00

Para el error del *scan line* corrector para las escenas provenientes del satélite Landsat 7 se estimaron los límites de cada categoría de las zonas sin información visualizando la tendencia con apoyo de las franjas visibles. Afortunadamente el ancho de las bandas sin información no es lo suficientemente grande como para imposibilitar la tendencia del límite de la categoría identificada.

Para extraer las plumas de detritos suspendidos, se eliminó de cada escena la superficie continental utilizando como límite de costa el límite estatal 2010 de INEGI con un buffer o área de influencia de acuerdo al tamaño de pixel de cada imagen para garantizar la no interferencia de la porción continental en la clasificación. Una vez obtenida sólo la parte de mar en cada escena (Figura 3), por medio de la técnica de clasificación no supervisada se creó una máscara de filtrado con base a todos aquellos pixeles con alta reflectividad correspondientes a zonas cubiertas con nubes o errores radiométricos para posteriormente eliminarlos de la imagen.

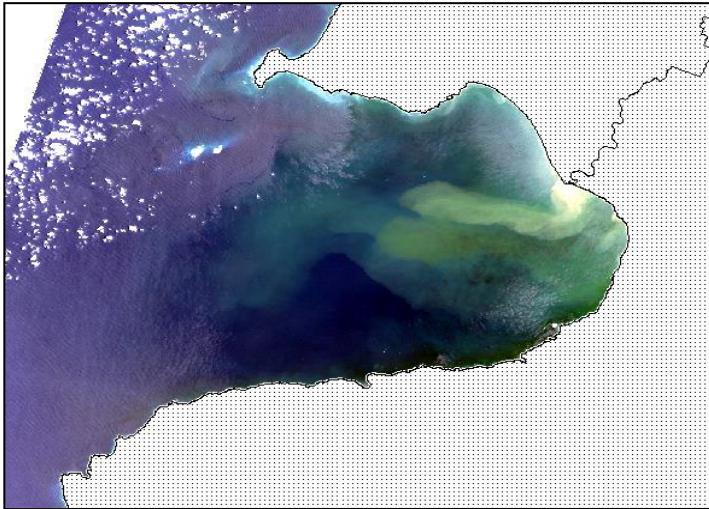


Figura 3. Escena sin el ruido radiométrico de la parte continental y nubes.

Una vez con la imagen sin la parte continental y sin el error radiométrico de las nubes, se corrió nuevamente el algoritmo de la clasificación no supervisada utilizando todas las bandas de la escena para obtener un archivo dividido en distintas superficies (clases) de las cuales se vectorizaron sólo las correspondientes a las plumas de detritos (Figura 4).

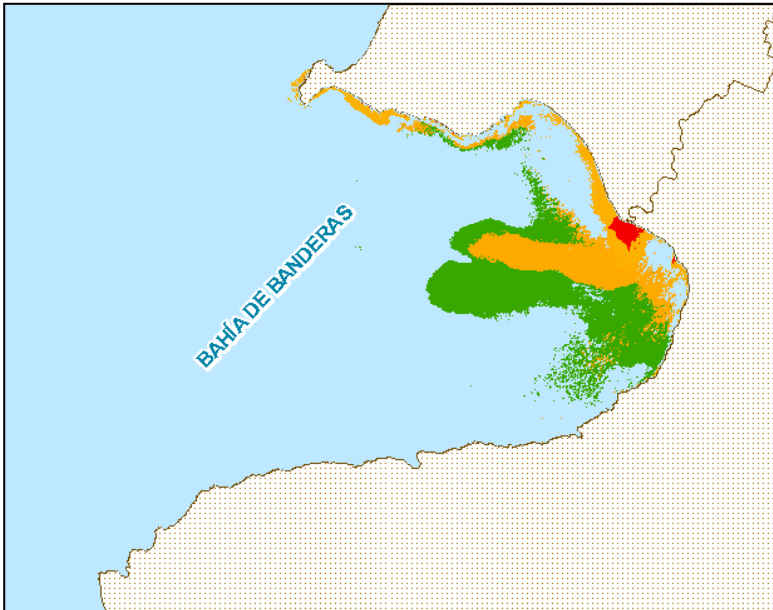


Figura 4. Pluma de detrito vectorizada. Rojo alta concentración, naranja concentración media y verde pluma difuminada o en proceso de sedimentación.

Se identificaron tres tipos de plumas según la concentración de partículas suspendidas y se establecieron fronteras radiométricas para cada categoría y sensor con la finalidad de hacerlas comparables a través de todo el periodo. Para representar el promedio de la superficie de la bahía cubierta por plumas se diseñaron cinco categorías (1, 1.01-1.50, 1.51-2.00, 2.01-2.50 y 2.51-3.00) donde la primera es siempre dispersa y la última muy densa.

Resultados

Los resultados presentados no deben de considerarse como mapas de contaminantes ya que este trabajo no tuvo la intención de catalogar los tipos de contaminantes presentes en las plumas, sino más bien se deben de tomar como mapas de vulnerabilidad que hablan de las trayectorias promedio que puede seguir un supuesto contaminante en diferentes épocas.

Aunque en la tesis se muestra un mapa con el promedio para cada mes de la distribución de detritos del periodo 2006-2014, en este artículo se muestra solo el panorama del promedio anual pudiendo ver las zonas de mayor concentración de todo el periodo analizado (Figura 5).



Figura 5. Pluma de detrito vectorizada. Rojo alta concentración, naranja concentración media y verde pluma difuminada o en proceso de sedimentación.

Un aspecto importante es que la mayor concentración de detritos suspendidos ocurre durante las primeras lluvias derivado a que en estas lluvias se arrastran los sedimentos y materia orgánica acumulados durante el periodo de secas.

En la Tabla 3 se muestra la comparación del caudal, precipitación y la concentración de plumas de detritos promedio por mes de todo el periodo en estudio. Marcado con verde se señalan los meses con el máximo de cada variable y con amarillo el mes con el segundo valor máximo de cada variable.

Como parte del análisis, se obtuvo la firma espectral de las tres concentraciones de sedimentos analizadas utilizando sólo las bandas 2, 3, 4, 5 y 6 de las escenas Landsat 8. Para las firmas espectrales se realizó un transecto iniciando en aguas sin sedimentos cruzando posteriormente zonas cubiertas por estos (Figura 6).

Tabla 3
Comparativa del Caudal-Precipitación-Plumas promedio por mes (2006-2014)

MES	Caudal Promedio (m ³ /s)	Precipitación Promedio (mm/día)	Tamaño Total de la Pluma (km ²)	Tamaño de la Pluma superior al 2% de concentración (km ²)
Enero	4.740	0.940	549.000	0.000
Febrero	2.330	1.518	364.340	0.000
Marzo	1.460	0.025	255.900	0.000
Abril	0.860	0.014	257.300	0.000
Mayo	1.270	0.359	248.390	1.430
Junio	5.570	5.826	545.570	29.420
Julio	17.650	9.479	672.830	9.710
Agosto	20.360	10.104	769.050	19.878
Septiembre	32.830	8.662	792.650	24.200
Octubre	16.340	3.333	497.280	4.920
Noviembre	8.800	0.785	430.177	0.256
Diciembre	5.550	0.836	308.480	0.000

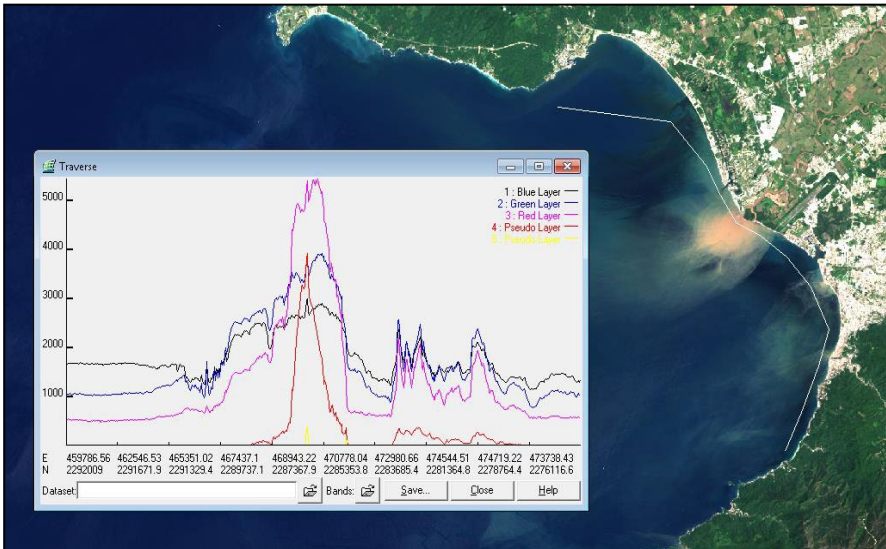


Figura 6. Firma espectral sobre imágenes Landsat 8 en puntos sobre agua de mar relativamente pura.

Para el primer caso (Figura 7), se muestran los valores de agua de mar relativamente pura extraídos de las imágenes. La mayor reflectividad en este punto ocurre en el color azul seguido por el verde y rojo; el infrarrojo cercano e infrarrojo medio tienen valores nulos. La forma de la firma espectral coincide con la del agua clara.

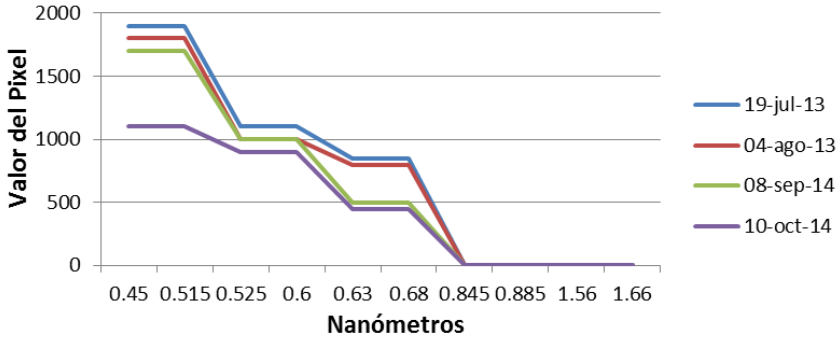


Figura 7. Firma espectral sobre imágenes Landsat 8 en puntos sobre agua de mar relativamente pura.

Para el segundo caso (Figura 8), la firma espectral sobre el agua de mar con concentración de categoría 2 de partículas suspendidas tiene mayor reflectividad en el verde seguido por el azul y el rojo. Sin embargo, aunque el verde y el azul predominan, vemos que el rojo tiene un crecimiento más marcado al ir aumentando la concentración de partículas suspendidas. Vemos también que la reflectividad del infrarrojo cercano e infrarrojo medio empieza a incrementarse aunque de forma muy lenta, lo que infiere la transición a agua turbia.

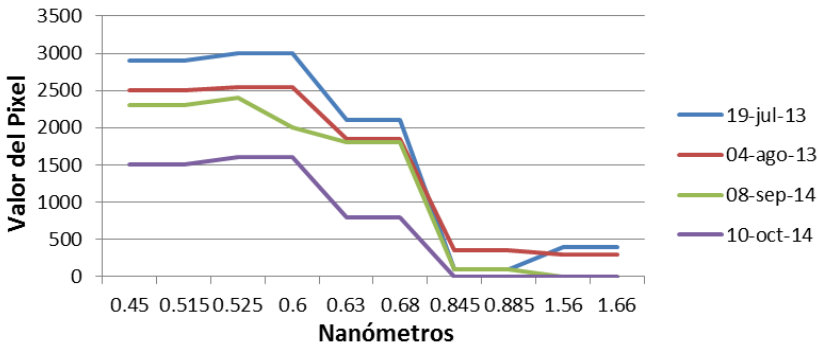


Figura 8. Firma espectral sobre imágenes Landsat 8 en puntos sobre agua de mar con concentración regular de partículas suspendidas.

Para el tercer caso (Figura 9) correspondiente a aguas con alta densidad de partículas suspendidas (categoría 3), la mayor respuesta espectral ocurre en el rojo seguido por el verde, infrarrojo cercano, azul y, finalmente, el infrarrojo medio; similar al del agua turbia.

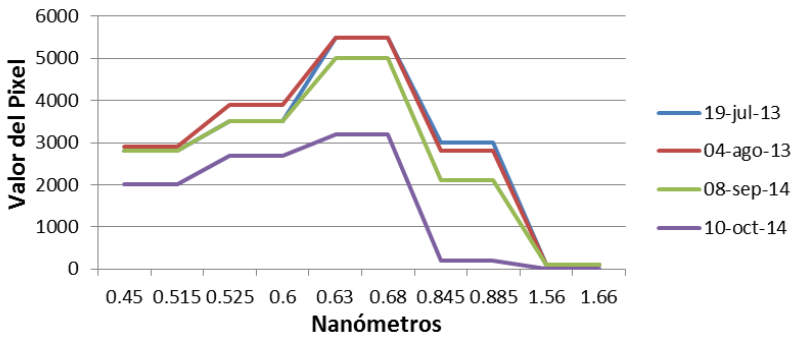


Figura 9. Firma espectral sobre imágenes Landsat 8 en puntos sobre agua de mar con alta concentración de partículas suspendidas.

Durante esta investigación se observó que la dirección de los detritos suspendidos no corresponde a la dirección del viento pues estos tienen una dirección predominante siempre hacia norte variando solo la intensidad; la dinámica corresponde a otros factores internos como las corrientes geostroficas o remolinos sub-superficiales. En el trabajo de realce de imágenes Landsat, fue posible visualizar en dos de ellas el remolino interno que, aunque es tema para otra investigación, parece ser el responsable del desplazamiento hacia el norte de los detritos suspendidos (Figura 10).

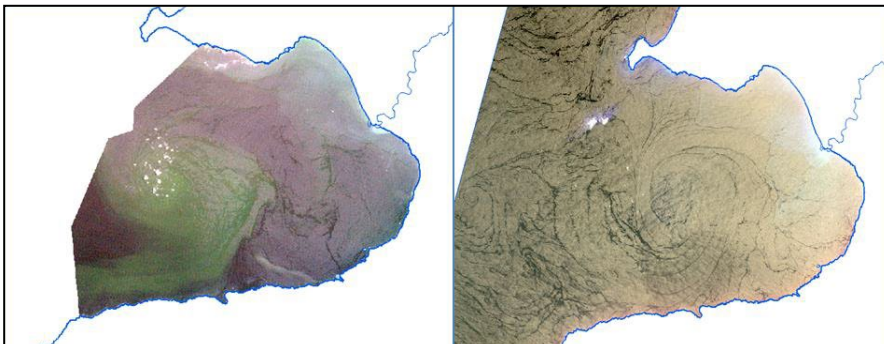


Figura 10. Remolinos ciclónicos internos. Arriba a la derecha corresponde al 19 de junio de 2008 del sensor Landsat 5 y a la izquierda del 04 de junio de 2014 del sensor Landsat 8 respectivamente.

Discusión y conclusiones

De acuerdo al análisis espectral de las imágenes de satélite y el análisis estadístico de la información vectorizada, se pudo detectar la tendencia de movimiento y concentración de las partículas suspendidas en la Bahía de Banderas.

Fue posible identificar o dividir en tres rangos, con base a la respuesta espectral, distintas concentraciones de las partículas suspendidas. Al sobreponer todas las plumas detectadas, y obtener un promedio por cada mes considerando los distintos rangos, durante todo el periodo de estudio, se pudo establecer tendencias de concentración para cada uno de los meses.

Los tres meses con mayor presencia de partículas y, que a la vez muestran las mayores concentraciones, corresponden a septiembre, agosto y julio. Así mismo, se observó que el mes con mayor caudal coincide con el mes donde se registran las mayores plumas mientras que el mes donde se registran las mayores precipitaciones coincide con el segundo mes de mayores plumas detectadas.

Se concluyó también que Las plumas del mes de agosto parecen responder al agua precipitada directamente sobre el cauce y a las escorrentías superficiales que alimentan a estos ríos mientras que, las grandes plumas del mes de septiembre donde las precipitaciones no presentan su máximo, parecen responder más a la aportación hacia los ríos de las grandes cantidades de agua precipitada en los meses anteriores incluyendo las del mes de agosto y almacenadas en los mantos freáticos que, junto con las lluvias propias del mes de septiembre, generan las mayores plumas registradas en el año.

La anterior hipótesis puede ser un tema de investigación en donde se deben involucrar mediciones en periodos lluviosos de mantos freáticos, represas entre otros y analizar más a detalle esta relación.

Por otra parte, se observó que gran parte de las partículas suspendidas tienden a desplazarse hacia la parte norte, pegados a la costa del municipio de Bahía de Banderas, para posteriormente salir a mar abierto mientras que, otra parte se sedimentan en el fondo de la bahía antes de que puedan salir a mar abierto.

Las imágenes de satélite nos muestran que las mayores concentraciones de detritos solo se presentan en promedio en el año alrededor de la desembocadura del Río Ameca disminuyendo su concentración conforme se alejan de este punto. La parte sur de la bahía parece estar casi siempre libre de la presencia de estos detritos mostrando solo bajas concentraciones en eventos de precipitaciones aisladas.

Se observa que el viento no tiene relación con la dirección de las plumas ya que es frecuente ver que la dirección observada de las plumas no siempre coincide con la dirección del viento aunado a que existen días donde no se registra viento y la pluma conserva la dirección de movimiento hacia el norte. Por lo anterior se deduce que el movimiento de las plumas es causado por fuerzas oceánicas como las corrientes, ondas o remolinos internos los cuales, estos últimos, se detectaron a través de un realce de falso color de escenas multiespectrales del satélite Landsat.

Por último, debido a la información y correlación obtenidas, es posible utilizar la presente metodología a otras regiones del mundo ya que el presente trabajo también utilizo de referencia otros estudios previos los cuales dieron resultados certeros. Se

recomienda la utilización de imágenes multiespectrales con mejor resolución espacial o la utilización de sensores multiespectrales en drones para lograr datos más finos los cuales siempre tienen que estar validada con algunas mediciones *insitu* si lo que se desea es también inferior la composición de los residuos suspendidos.

Bibliografía

- Acker, J., Ouillon, S., Gould, R. and Arnone, R. (2005). *Measuring Marine Suspended Sediment Concentrations from Space: History and Potential*, International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Halifax, NS, Canada.
- CEDESTUR-CEED-AEBB (2001). *Bahía de Banderas a futuro: 2000-2005*, Centro de Estudios Estratégicos para el Desarrollo Turístico Sostenible, Technical Report, Asociación de Empresarios de Bahía de Banderas, Puerto Vallarta.
- Del Castillo, C.E., F. Gilbes, P.G. Coble and F.E. Muller-Karger (2000). "On the Dispersal of Riverine Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) over the West Florida Shelf", *Limnology and Oceanography*, 45(6):1425-1432.
- Ekerchin, S. (2007). "Water Quality Retrievals from High Resolution IKONOS Multispectral Imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey", *Water Air Soil Pollut*, 183:239-251.
- Filonov, A.E. (2010). *Circulación y Transporte de Contaminantes Pasivos en la Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, México. Reporte Técnico Final*, COECyTJal.
- García, M.P. and Pérez, M.E. (1999). Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo), *Revista de Teledetección*, no. 11, pp. 13-22.
- Hu, C., E.T. Montgomery, R.W. Schmitt and F.E. Muller-Karger (2004). "The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats", *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(10-11):1151-1171.
- Kelly Liza (2010). "Variación espacio temporal de la calidad del agua en la zona de mayor influencia continental en la Bahía de Banderas, México", tesis de doctorado, Centro Universitario de la costa, Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Knaeps, E., Sterckx, S. and Raymaekers, D. (2010). "A Seasonally Robust Empirical Algorithm to Retrieve Suspended Sediment Concentrations in the Scheldt River", *Remote Sensing*, 2:2040-2059.
- Lohrenz, S.E., Dagg, M.J. and Whittedge, T.E. (1990). "Enhanced primary production at the plume/oceanic interface of the Mississippi River", *Continental Shelf Research*, 10:639-664.

- Miller, R.L. and B.A. McKee (2004). "Using MODIS Terra 250 m Imagery to Map Concentrations of Total Suspended Matter in Coastal Waters", *Remote Sensing of Environment*, 93:259-266.
- Mireles, L.I.O. (2012). "Estructura Termohalina y Circulación Geostrofica en Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, México", tesis de maestría Ciencias en Hidrometeorología, Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías División de Ciencias Básicas, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.
- Muller-Karger, F.E. and R. Varela (1990). "Influjo del río Orinoco en el mar Caribe: Observaciones con el CZCS desde el espacio", *Mem. Soc. Cien. Nat.*, La Salle, 131-134:365-384.
- Muller-Karger, F.E.; C.R. McClain, T.R. Fisher, W.E. Esaias and R. Varela. (1989). "Pigment distribution in the Caribbean Sea: observations from the space", *Progress in Oceanography*, 23:23-69.
- Muller-Karger, F.E., P.L. Richardson and D. McGillicuddy (1995). "On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic", *Deep-Sea Research I*, 42(11/12):2127-2137.
- Pérez, B.D. y Nadja, O.C.F. (2011). "Comparación de la dinámica de sedimentos suspendidos entre una bahía tropical abierta y una bahía tropical cerrada", Departamento de Física y Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Puerto Rico, pp. 15-16.
- Plata, L.J. (2007). "Dinámica de las Ondas Internas en la Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit, México", tesis doctoral, Facultad de Ciencias Marinas, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, 152 pp.
- Ritchie, J.C. and Cooper, C.M. (2001). "Remote Sensing Techniques for Determining Water Quality: Applications to TMDLs", in *TMDL Science Issues Conference*, Water Environment Federation, Alexandria, VA, pp. 367-374.
- Ritchie, J. and F. Schiebe (1986). "Monitoring Suspended Sediments with Remote Sensing Techniques", *Hydrologic Applications of Space Technology*, pp. 233-243.
- Rodríguez, G.V. and F. Gilbes S. (2009). "Using MODIS 250 m Imagery to Estimate Total Suspended Sediment in a Tropical Open Bay", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 3(1):36-44.
- Salinas, G.F. y Pinet, P.R. (1991). *Corrientes Geostroficas frente a Bahía Magdalena Baja California Sur, México*, CICIMAR, vol. 6, núm. 2.

Referencias Digitales

- Aguaysig (2012). Descargar imágenes Landsat de USGS. Recuperado de: <http://www.aguaysig.com/2012/05/descargar-imagenes-landsat-de-usgs.html>.

- Carmen González Toro, octubre 2011, *Monitoreo de la calidad del agua, La turbidez. Servicio de extensión agrícola*, Colegio de Ciencias Agrícolas, pp. 2-6. <<http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>>.
- Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa (2016). “Estaciones Meteorológicas en Tiempo Real”. Recuperado de: <<http://cemco.org.mx/>>.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) (1998). “Cuencas Hidrológicas (CNA)”. Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/hidro/chiidro/rh250kgw>.
- (2015). *Atlas Digital del Agua México 2012*. Recuperado de: <<http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>>.
- Earthdata, NASA (2015). Rapid Response / Earthdata (descarga de imágenes de satélite MODIS). Recuperado de: <<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response>>.
- El Informador (2008). “Ríos contaminan playas en Bahía de Banderas”, Recuperado de: <<http://www.informador.com.mx/jalisco/2008/7414/1/rios-contaminan-playas-en-bahia-de-banderas.htm>>.
- Estrucplan On Line (2015). “La contaminación del Río Ameca y su impacto en la salud”. Recuperado de: <<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=2235>>.
- Pro.arcgis (2015). Clasificación no supervisada de cluster ISO—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Recuperado de: <<http://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/iso-cluster-unsupervised-classification.htm>>
- SEMARNAT (2015). Programa de Playas Limpias, Puerto Vallarta/Bahía de Banderas, Jalisco. Recuperado de: <http://www.semarnat.gob.mx/playas/playas_limpias/destinos/puerto-vallarta>.

Análisis espacial de los cambios de usos del suelo. Aplicación con Sistemas de Información Geográfica

Luis Humacata*

Recibido 31 de agosto de 2018; aceptado 21 de noviembre de 2018

Abstract

The study of spatial dynamics incorporates time and generates an approach of great importance in scientific research, whose purpose is to determine the evolution of patterns of spatial distribution of land uses. The present work develops the conceptual and methodological aspects of spatial evolution analysis. Focused on the perspective of Rationalist Geography, we proceed to establish the scope of the concept and its link to the Geographic Information Systems as a tool oriented to the methodological application of cartographic superposition. In this sense, the methodology of detection of changes in land uses is presented, whose cartographic and statistical results allow to assess their magnitude, focused on determining the areas of profit and loss, net and total change, and exchanges between categories of uses of the land floor. The study area corresponds to three parties of the Metropolitan Region of Buenos Aires, where the urban growth of the urban agglomeration takes place, covering the period 2000-2010. The results obtained from the methodological application indicate the progress of urbanization on productive surfaces and the natural environment, mainly affecting agricultural and forestry activities. At the same time the process of agriculturization is appreciated that advances on spaces traditionally destined to the cattle and conservation activity. These results contribute to the realization of the diagnosis of the spatial dynamics of the occupation of the soil of the study area.

Key words: spatial analysis, changes in land use, Geographic Information Systems, Metropolitan Region of Buenos Aires.

* Becario doctoral, Comisión de Investigaciones Científicas, Universidad Nacional de Luján, Ruta Nacional 5 y Av. Constitución, 6700, Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina, correo electrónico: luishumacata@hotmail.com

Resumen

El estudio de la dinámica espacial incorpora el tiempo y genera una aproximación de gran importancia en la investigación científica, cuya finalidad es determinar la evolución de los patrones de distribución espacial de usos del suelo. El presente trabajo desarrolla los aspectos conceptuales y metodológicos del análisis de evolución espacial. Centrado en la perspectiva de la Geografía Racionalista, se procede a establecer los alcances del concepto y su vinculación a los Sistemas de Información Geográfica como herramienta orientada a la aplicación metodológica de superposición cartográfica. En este sentido, se presenta la metodología de detección de cambios de usos del suelo, cuyos resultados cartográficos y estadísticos permiten evaluar su magnitud, enfocados en determinar las superficies de ganancias y pérdidas, cambio neto y total, y los intercambios entre categorías de usos del suelo. El área de estudio corresponde a tres partidos de la Región Metropolitana de Buenos Aires, donde se produce el crecimiento oeste de la aglomeración urbana, abarcando el periodo 2000-2010. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación metodológica señalan el avance de la urbanización sobre superficies productivas y del medio natural, incidiendo principalmente en las actividades agrícolas y forestales. A su vez se aprecia el proceso de agriculturización que avanza sobre espacios destinados tradicionalmente a la actividad ganadera y de conservación. Estos resultados aportan a la realización del diagnóstico de la dinámica espacial de la ocupación del suelo del área de estudio.

Palabras clave: *análisis espacial, cambios de usos del suelo, Sistemas de Información Geográfica, Región Metropolitana de Buenos Aires.*

Resumo

O estudo da dinâmica espacial incorpora o tempo e gera uma aproximação de grande importância na pesquisa científica, cuja finalidade é determinar a evolução dos padrões de distribuição espacial de usos do solo. O presente trabalho desenvolve os aspectos conceituais e metodológicos de análises da evolução espacial. Centrado na perspectiva da Geografia Racionalista, pretende-se estabelecer os alcances do conceito e sua vinculação aos Sistemas de Informação Geográfica como ferramenta orientada a aplicação metodológica de superposição cartográfica. Neste sentido, se apresenta a metodologia de detecção de mudanças de usos do solo, cujos resultados cartográficos e estatísticos permitem avaliar sua magnitude, focados em determinar as superfícies de ganhos e perdas, mudanças líquidas e total, e as correlações entre categorias de usos do solo. A área de estudo corresponde a um terço da Região Metropolitana de Buenos Aires, onde se encontra o crescimento oeste da aglomeração urbana, abarcando o período 2000-2010. Os resultados obtidos a partir da aplicação metodológica assinalam o avanço da urbanização sobre superfícies produtivas e do meio natural, incidindo principalmente nas atividades agrícolas e florestais. Ao mesmo tempo, se

aprecia o processo de agricultura que avança sobre espaços destinados tradicionalmente a atividade pecuária e de conservação. Estes resultados aportam a realização do diagnóstico da dinâmica espacial da ocupação do solo da área de estudo.

Palavras chave: *análise espacial, mudanças de usos do solo, Sistemas de Informação Geográfica, Região Metropolitana de Buenos Aires.*

Introducción

Los trabajos que abordan la dinámica urbana ponen un mayor énfasis en distinguir los aspectos negativos que atentan contra la sostenibilidad territorial (Henríquez Ruíz, 2014), principalmente en los espacios periféricos de las grandes ciudades, donde se verifican empíricamente importantes cambios de usos del suelo y conflictos ante la expansión urbana (Arellano y Roca, 2010; Plata Rocha *et al.*, 2009). En este marco, como señalan Buzai y Baxendale (2006), el análisis socioespacial de la expansión de usos del suelo se realiza sobre distribuciones en las cuales existe una tensión constante entre demanda, oferta y decisiones sobre la organización del espacio. Entre estas tensiones, a causa de su dinamismo, las temáticas centrales se refieren principalmente a la modelización del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo.

La expansión urbana generada por la dinámica de crecimiento de las grandes ciudades latinoamericanas está produciendo, en las últimas décadas, conflictos por la competencia espacial entre usos del suelo en aquellos territorios que constituyen su interfase urbano-rural (Janoschka, 2002; Borsdorf, 2003). El avance de la urbanización dispersa en territorios de la periferia metropolitana genera la fragmentación del territorio, la pérdida de usos del suelo que sustentan actividades socioeconómicas tradicionales y el impacto ambiental adverso en cuanto a la disminución de los servicios ecosistémicos (Matteucci *et al.*, 2006; Arellano y Roca, 2010). Es por lo dicho que el presente trabajo tiene como objetivo abordar la dinámica de ocupación del suelo en partidos que integran la interfase urbano-rural de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), y que están sujetos a procesos de urbanización de gran dinamismo vinculados a la expansión del aglomerado Gran Buenos Aires. La relevancia de la temática abordada está dada por el impacto negativo que genera el cambio en los usos del suelo a través de la expansión urbana en espacios naturales de conservación y en sitios de producción rural tradicional. Se generan conflictos de competencia espacial entre usos del suelo y ello afecta notablemente a las actividades desarrolladas por las poblaciones locales, entre las que cabe mencionar la modificación de la topografía que genera problemas ambientales severos, como el caso de las inundaciones en zonas urbanas y rurales.

Para ello se procedió metodológicamente a la elaboración de cartografía temática de coberturas y usos del suelo en dos cortes temporales, años 2000 y 2010, constituyéndose en la base cartográfica para la aplicación de los procedimientos de detección de cambios de usos del suelo en el área de estudio. Los resultados se orientan a generar información actualizada de la dinámica de ocupación de usos del suelo en el área de estudio en el periodo analizado, constituyéndose en una valiosa herramienta de base para el diagnóstico territorial a escala urbano-regional.

Aspectos conceptuales

Análisis de la evolución espacial en Geografía

Si bien la Geografía es considerada como una ciencia del presente, en ningún momento se deja de reconocer la importancia de la dimensión temporal en estudios de mayor alcance, siendo que ir hacia el pasado nos muestra el origen de las manifestaciones empíricas del presente. De este modo, podemos señalar que un análisis centrado en el dónde, corresponde a una visión basada en la localización, y en el cuándo, en una visión basada en el tiempo. En este sentido, el cómo, desde un punto de vista espacial, presentaría el camino evolutivo espacio-temporal. El concepto de evolución espacial considera la incorporación de la dimensión temporal a través de la permanente transición de un estado a otro (Buzai, 2010).

Desde un abordaje principalmente espacial, la Geografía en su vertiente cuantitativa y racionalista ha desarrollado relevantes avances en la sistematización de procedimientos analíticos con la finalidad de determinar la evolución de los patrones de distribución espacial de usos del suelo. En este sentido, la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha posibilitado la obtención de resultados cartográficos y numéricos de suma utilidad en el ámbito de la planificación territorial. Los avances en la modelización de aspectos evolutivos del espacio geográfico (Aguilera Ontiveros, 2002; Batty, 2005; Buzai y Baxendale, 2012; Henríquez Ruíz, 2014), como aquellos orientados al análisis del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo, brindan importantes herramientas metodológicas para el estudio de la dinámica de ocupación del suelo a escala urbano-regional. Dentro de esta línea podemos señalar la metodología de detección de cambios de usos del suelo desarrollada por Pontius *et al.*, (2004). En este marco podemos señalar números trabajos de investigación a nivel nacional e internacional que han obtenido resultados satisfactorios de la aplicación metodológica (Martínez Vega *et al.*, 2008; Pineda Jaimes *et al.*, 2008; Plata Rocha *et al.*, 2009; Ramírez y Pértile, 2013; Lara, 2014; Humacata, 2017).

Cabe considerar también que la Geografía, siguiendo a Buzai (2010), además de definirse básicamente como una ciencia del presente que acude al pasado para ver la génesis de las configuraciones espaciales actuales también puede considerarse una ciencia del futuro (ciencia prospectiva). Los avances en esta línea de investigación, a

partir de trabajos de modelización (entendida como proceso que lleva a un modelado dinámico de datos espaciales), se apoyan en la metodología de análisis de evaluación multicriterio para la identificación de potenciales conflictos entre usos del suelo (Malczewski, 1999; Gómez Delgado y Barredo Cano, 2006; Buzai *et al.*, 2017), y los modelos de simulación de configuraciones espaciales futuras en base a autómatas celulares (Aguilera Benavente *et al.*, 2009; Gómez Delgado y Rodríguez Espinosa, 2012; Linares, 2015).

La interfase urbano-rural: El fenómeno de la urbanización dispersa

La dinámica de ocupación de usos del suelo vinculada a la expansión urbana será considerada a partir del fenómeno de urbanización dispersa o *urban sprawl*; este concepto se relaciona con el proceso de urbanización desde la ciudad compacta a estructuras más fragmentadas, generando el avance del uso del suelo urbano en territorios periféricos.

Si bien existen varias definiciones de este concepto, la mayoría de los trabajos concuerdan en vincularlo con la ocupación dispersa de las nuevas urbanizaciones caracterizado por la baja densidad edificatoria, el avance del uso urbano y de servicios sobre actividades productivas y del medio natural, generando la fragmentación del territorio (Arellano y Roca, 2010). El crecimiento acelerado de la urbanización provoca conflictos de usos del suelo y problemas ambientales en los espacios rurales hacia los cuales se dirige. Esta configuración espacial de las ciudades metropolitanas indica un continuo avance de la urbanización sobre espacios destinados tradicionalmente a actividades agropecuarias. Estos procesos dan como resultado la ampliación de la periferia metropolitana, constituyéndose en el espacio de mayor dinamismo (Barsky, 2005), lo cual implica una mayor atención desde el ordenamiento territorial.

Descripción del área de estudio

La Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) está integrada por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y 40 municipios bonaerenses. Posee una superficie de 13 975 km² y se constituye en el centro de mayor concentración de población a nivel nacional, con 14 839 746 habitantes (INDEC, 2010). El área de estudio (Figura 1) de la presente investigación corresponde a tres partidos del sector de crecimiento oeste metropolitano: General Rodríguez (87 185 hab), Luján (106 273 hab) y Moreno (452 505 hab), con una población total de 645 963 habitantes (INDEC, 2010). Estos partidos presentan diferencias graduales en cuanto al impacto generado por la dinámica metropolitana, por lo que el abordaje corresponde a un nivel subregional, a partir de considerar la dinámica de ocupación del suelo de uno de los sectores de crecimiento metropolitano asociado a la red de autopistas.

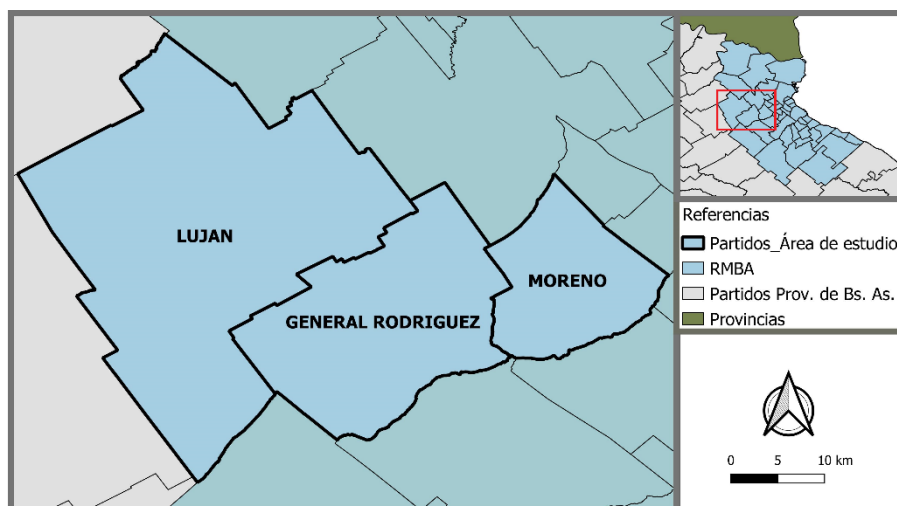


Figura 1. Partidos del sector de crecimiento oeste metropolitano.
Fuente: elaboración del autor.

Aspectos metodológicos

Creación de la base de datos en SIG

Para la realización de la cartografía de usos del suelo se han utilizado dos imágenes satelitales provenientes del satélite *Landsat 5* (sensor TM). Estas imágenes se obtuvieron del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*, siglas en inglés). La fecha de adquisición de las imágenes corresponde a los meses de verano (diciembre-enero). Los procedimientos metodológicos para la elaboración de dicha cartografía se pueden sintetizar a partir de los siguientes puntos:

- a) *Pre-procesamiento de imágenes*: se aplicaron los modelos de corrección atmosférica para reducir los efectos de la atmósfera en las imágenes, a partir del cálculo de parámetros de calibración.
- b) *Análisis de interpretación visual*: se realizó la interpretación visual de las distintas imágenes para obtener una caracterización cualitativa de las distintas coberturas/usos del suelo en el área de estudio. El objetivo fue discriminar las coberturas y usos del suelo para definir las categorías de análisis.
- c) *Procesamiento digital de imágenes*: se realizó la clasificación digital de las imágenes para la elaboración de cartografía de los años 2000 y 2010. Esta tarea se apoya en el punto anterior, e implicó la identificación de regiones de interés a través de las cuales se procedió a la clasificación supervisada de imágenes.

- d) *Pos-procesamiento de imágenes*: consiste en evaluar la clasificación digital realizada en la fase de asignación. Además se incluyen los pasos de combinación de resultados parciales, producto del análisis visual y digital, para lograr la cartografía temática final.

Esta metodología ha permitido elaborar cartografía temática homogénea en formato *raster*, con un tamaño de píxel de 20x20 metros. De este modo, quedan definidas nueve clases en un solo nivel de jerarquización: 1) Infraestructura de transporte; 2) Cursos de agua; 3) Urbano disperso; 4) Urbano tradicional o compacto; 5) Forestal-Natural; 6) Ganadero; 7) Agrícola; 8) Hortícola-Intensivo; 9) Deportivo-Recreativo. A continuación se presentan los dos mapas elaborados para el año 2000 y 2010 (Figura 2).

Detección de cambios de usos del suelo

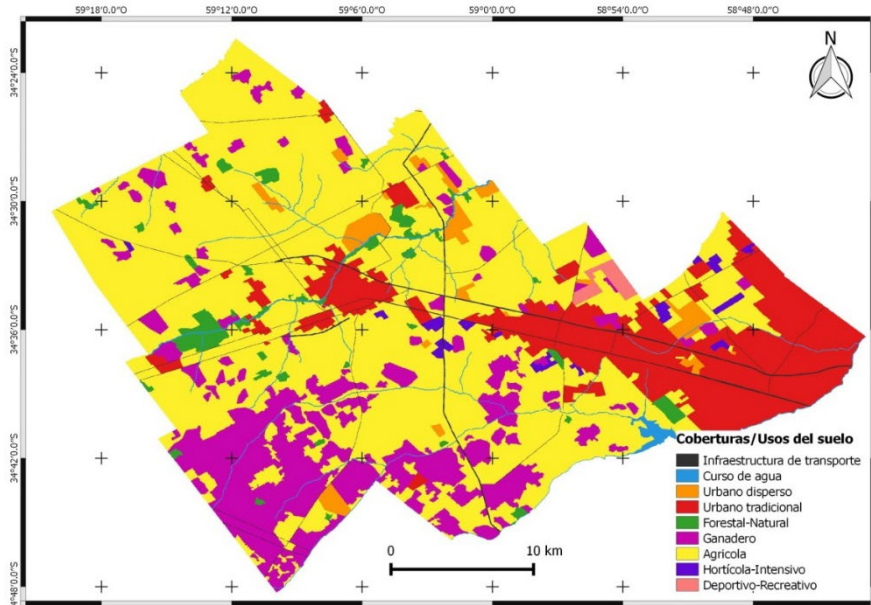
La aplicación se basa en la metodología de detección de cambios desarrollada por Pontius *et al.* (2004). Los procedimientos parten de la tabulación cruzada de dos mapas, lo que genera la denominada matriz de cambios (Tabla 1). La matriz se organiza en filas y columnas. En las primeras se encuentran representadas las categorías del mapa del corte temporal 1 (T1), y en las columnas están las categorías del segundo corte temporal (T2). En la diagonal de la matriz (señalada en gris) se encuentran representadas las superficies que han permanecido estables entre los dos cortes temporales, mientras que fuera de la matriz se encuentran las superficies de cada categoría que presentan transiciones a otras categorías desde tiempo 1 al tiempo 2. Las columnas Total T1 y Total T2 recogen la suma de cada categoría para cada año respectivamente. A ello se suma la columna referida a las pérdidas de superficie de cada categoría entre los dos cortes temporales, y la fila de las ganancias que cada categoría obtuvo en el periodo analizado.

Tabla 1
Matriz de tabulación cruzada (dos cortes temporales)-Detección de cambios

Categorías	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría n	Total T1	Pérdidas
Categoría 1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{1n}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{11}$
Categoría 2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{2n}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{22}$
Categoría 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{3n}	P_{3+}	$P_{3+} - P_{33}$
Categoría n	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}	P_{nn}	P_{n+}	$P_{n+} - P_{nn}$
Total T2	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+n}	1	
Ganancias	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+n} - P_{nn}$		

Fuente: elaboración del autor en base a Pontius *et al.* (2004).

A



B

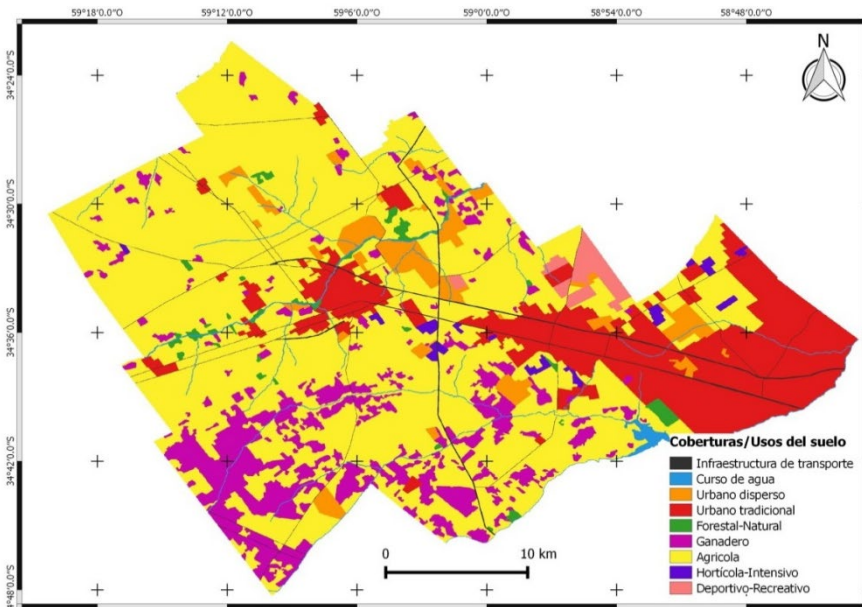


Figura 2. Mapa de usos del suelo para el año 2000 (A) y 2010 (B).
Fuente: elaboración del autor.

Indicadores de cambios de usos del suelo

A partir de la matriz de tabulación cruzada se calculan una serie de indicadores que permiten medir las ganancias, las pérdidas, el cambio neto y total, y los intercambios entre las distintas categorías de coberturas y usos del suelo definidas para el periodo de estudio (Plata Rocha *et al.*, 2009). A continuación se presentan las definiciones de estos parámetros:

- Ganancias: se obtienen a partir de la diferencia de la suma total del tiempo 2 (T2) y el valor de la diagonal correspondiente a cada categoría.
- Pérdidas: se obtienen a partir de la diferencia de la suma total del tiempo 1 (T1) y el valor de la diagonal correspondiente a cada categoría.
- Cambio neto: este valor se obtiene a partir de la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría.
- Intercambio: se define como el doble del valor mínimo de las ganancias o las pérdidas.
- Cambio total: es el resultado de la suma de las ganancias y las pérdidas.

Cartografía dinámica de usos del suelo

La cartografía dinámica es una herramienta de importancia para analizar los cambios en las configuraciones espaciales de usos del suelo en un periodo determinado. De este modo, es posible el descubrimiento de la evolución de los patrones de distribución espacial de cada categoría. Es así como los procedimientos de superposición temática se orientan a la definición de correspondencias espaciales desde un enfoque temporal. En este sentido, se procede al cruce de categorías de dos mapas de usos del suelo correspondiente a dos cortes temporales, dando como resultado la combinación de categorías que indican cambios y permanencias de usos del suelo.

Resultados

La metodología de detección de cambios ha sido estandarizada a partir del módulo *Land Change Modeler for Ecological Sustainability*, que se encuentra como una aplicación vertical dentro del Sistema de Información Geográfica *IDRISI*, y se ocupa del estudio de los problemas de conversión acelerada de los usos del suelo con objetivos orientados a la conservación de la biodiversidad (Eastman, 2012). De esta manera es posible obtener resultados numéricos y cartográficos como insumos básicos para el análisis estadístico y espacial respectivamente, convirtiéndose en una propuesta metodológica de suma importancia a la hora de contar con un diagnóstico de la evolución espacial. En el presente trabajo, se realizó una primera aproximación con la finalidad de obtener resultados generales de cambios de usos del suelo.

Análisis espacial de los cambios de usos del suelo

La composición de coberturas/usos del suelo que se utiliza en la presente investigación puede clasificarse en tres grandes grupos de categorías: Superficies Artificiales (Urbano compacto, Urbano disperso y Deportivo-Recreativo), Superficies Productivas (Agrícola, Ganadero y Hortícola-Intensivo) y Superficies del Medio Natural (Cursos de agua y Forestal-Natural). Según los valores calculados para el año 2010, el área de estudio cuenta con una gran proporción de territorio destinado a las actividades primarias, entre las que podemos mencionar a la agricultura (con el 61.72 %) seguido de la ganadería (11.46 %), ocupando un poco más del 70 % de su territorio. Las superficies artificiales ocupan el 23.5 %, siendo aquella destinada a la urbanización tradicional la más significativa (16.78 %); por último se encuentran las coberturas que integran el Medio Natural con un 2.5 %. La Tabla 2 presenta los valores generales de la comparación entre los dos cortes temporales.

Tabla 2
Valores generales de cambios de usos del suelo (2000-2010)

<i>Categorías</i>	<i>2000 (ha)</i>	<i>2010 (ha)</i>	<i>% sobre total 2000</i>	<i>% sobre total 2010</i>	<i>2010-2000 (ha)</i>	<i>Incremento sobre 2000 (%)</i>
Infraestructura de transporte	1 809	1 809	1,4	1,4	0	0
Cursos de agua	2 083	2 083	1,6	1,6	0	0
Urbano disperso	3 003	5 464	2	4	2 461	82
Urbano compacto	21 326	22 228	16	17	901	4
Forestal-Natural	2 861	1 288	2	1	-1 573	-55
Ganadero	21 290	15 177	16	11	-6 113	-29
Agrícola	78 305	81 747	59	62	3 443	4
Hortícola-Intensivo	1 105	1 030	1	1	-76	-7
Deportivo-Recreativo	682	1 628	1	1	946	139

Fuente: elaboración del autor.

Un análisis comparativo con los datos del año 2000, señala que el uso Forestal-Natural fue el que mayor superficie ha perdido, presentando una disminución del 50%

con respecto al periodo anterior. El uso Ganadero es otra de las categorías que presenta una significativa disminución de su superficie (con una reducción del 29%). Por su parte, la superficie destinada al uso Hortícola-Intensivo disminuyó casi el 7%. Entre las categorías que mayores incrementos han tenido, se encuentra el uso Deportivo-Recreativo, con un aumento de su superficie de 139%; seguido del uso Urbano disperso (con un 82%). Las restantes categorías corresponden al uso Agrícola (4.4%) y Urbano tradicional o compacto (4.2%). Las categorías que no presentaron modificaciones en su superficie fueron Infraestructura de transporte y Cursos de agua.

A partir de un análisis general de la matriz de cambios (Tabla 3), podemos identificar las zonas estables, siendo aquellas que no han presentado cambios entre el año 2000 y 2010, y las zonas dinámicas, referidas a aquellas que han experimentado algún tipo de cambio (ganancias y/o pérdidas). Con una superficie total de 132 454 hectáreas, el área de estudio cuenta con una mayor proporción de su territorio que ha permanecido estable, representando una superficie del 85% (112 398 ha), siendo la superficie de las zonas dinámicas de un 15% (20 056 ha), dando como resultado una tasa de cambio global de 2 006 ha/año. El mapa de la Figura 3 presenta la distribución espacial de las superficies estables y dinámicas para el periodo 2000-2010.

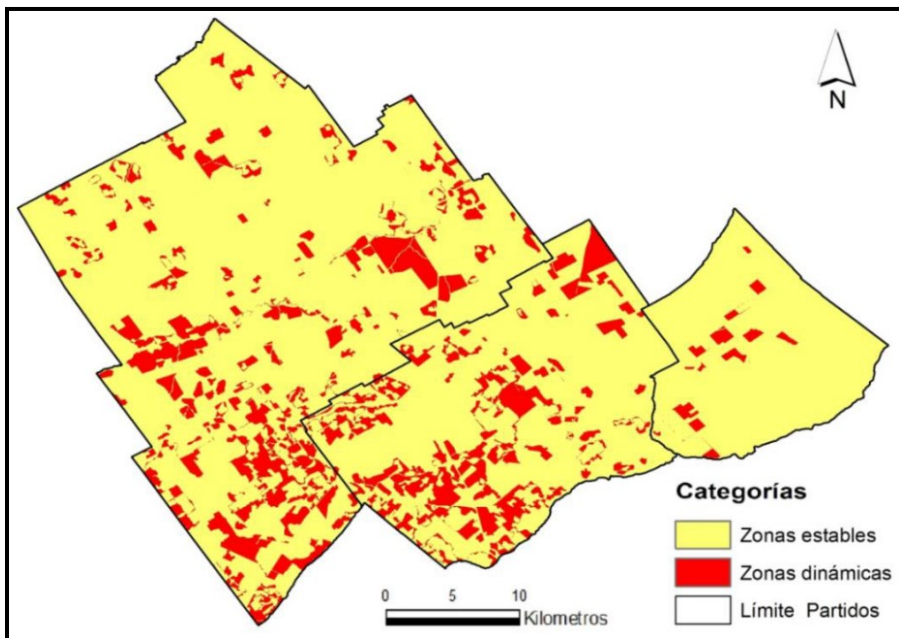


Figura 3. Superficies estables y dinámicas (2000-2010).
Fuente: elaboración del autor.

Un análisis más detallado de la información obtenida en dicha matriz, nos indica que las categorías que han ganado mayores superficies en valores absolutos son el uso Agrícola (11 283.2 ha), Ganadero (4 255.16 ha), y Urbano disperso (2 461.4 ha); seguido de Deportivo-Recreativo (946.04 ha), y Urbano compacto (903.16). Por otro lado, las categorías que han perdido mayores superficies en valores absolutos son el uso Ganadero (10 360.44 ha), Agrícola (7 839.32 ha), y en menor medida Forestal-Natural (1 712.24 ha).

Tabla 3
Matriz de cambios de usos del suelo en el periodo 2000-2010 (ha)

Categorías	Transp	Curs- agua	Urb- dis	Urb- com	Fores- Nat	Ganad	Agríc	Hort- Int	Dep- Recre	Suma T1	Pérdidas
Infraestructura de transporte	1809	0	0	0	0	0	0	0	0	1809	0
Cursos de agua	0	2083	0	0	0	0	0	0	0	2084	0
Urbano disperso	0	0	3003	0	0	0	0	0	0	3003	0
Urbano compacto	0	0	0,08	21324	0	0	2	0	0	21326	2
Forestal- Natural	0	0	76	3	1146	167	1465	1	0	2858	1712
Ganadero	0	0	352	29	14	10922	9745	0	220	21282	10360
Agrícola	0	0	2033	798	128	4088	70464	65	726	78303	7839
Hortícola- Intensivo	0	0	0	71	0	0	71	964	0	1105	141
Deportivo- Recreativo	0	0	0	0	0	0	0	0	682	682	0
Suma T2	1809	2083	5464	22227	1288	15177	81747	1030	1628	132454	20056
Ganancias	0	0	2461	903	141	4255	11283	66	946	20056	

Fuente: elaboración del autor.

La Figura 4 presenta las ganancias y las pérdidas experimentadas por las categorías en el periodo de estudio. Las ganancias se encuentran a la derecha del gráfico (color verde) con valores positivos, mientras que las pérdidas ocupan el lado izquierdo (color violeta), señalando con valores negativos la disminución de superficie.

Los indicadores de cambios se presentan en la Tabla 4. Los mismos han sido calculados a partir de la matriz de tabulación cruzada, y nos permiten cuantificar la superficie (expresada en hectáreas) de cambio de cada categoría, señalando aquellas que han obtenido ganancias y/o pérdidas, la contribución de cada una al cambio neto y total, y los intercambios entre la totalidad de categorías.

La información aportada sobre la relación entre las ganancias y las pérdidas de cada categoría puede expresarse a partir del cambio global, que se obtiene de la suma de ambos indicadores. Se desprende que la categoría Agrícola es la que mayores

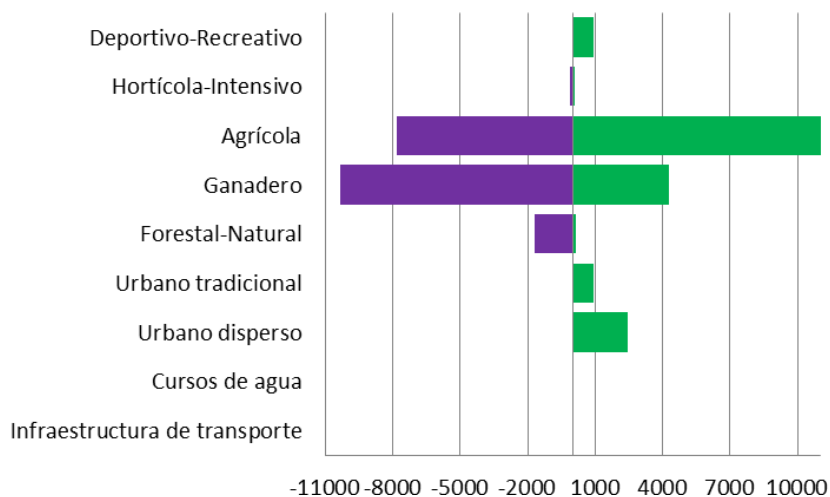


Figura 4. Ganancias y pérdidas de coberturas/ usos del suelo entre 2000 y 2010.

Fuente: elaboración del autor.

Tabla 4
Indicadores de cambios en el período 2000-2010 (ha)

Categorías	Sup. T1	Sup. T2	Ganancia	Persistencia	Pérdida	Cambio Neto	Cambio Total	Intercambio
Infraestructura de transporte	1809	1809	0	1809	0	0	0	0
Cursos de agua	2084	2083	0	2083	0	0	0	0
Urbano disperso	3003	5464	2461	3003	0	2461	2462	1
Urbano tradicional	21326	22227	903	21324	2	901	905	4
Forestal-Natural	2858	1288	141	1146	1712	-1571	1854	283
Ganadero	21282	15177	4255	10922	10360	-6105	14616	8510
Agrícola	78303	81747	11283	70464	7839	3444	19123	15679
Hortícola-Intensivo	1105	1030	66	964	141	-76	207	132
Deportivo-Recreativo	682	1628	946	682	0	946	946	0

Fuente: elaboración del autor.

cambios ha experimentado (19 122.52 ha), seguido del uso Ganadero (14 615.6 ha), Urbano disperso (2 461.84), y Forestal-Natural (1 853.64 ha). El resto de las categorías presentan valores inferiores a las 1 000 ha. A este análisis global se le puede introducir aquellos aportes (tanto positivos como negativos) generados a partir de la diferencia entre las ganancias y pérdidas, obteniéndose así el cambio neto de cada categoría.

Como muestra el gráfico de la Figura 5, los cambios netos positivos más significativos se dan en las categorías Agrícola (3 444 ha) y Urbano disperso (2 461 ha), seguido con valores inferiores por los usos Deportivo-Recreativo y Urbano compacto. Por otro lado, las categorías Ganadero (-6 106 ha), Forestal-Natural (-1 571 ha) y Hortícola-Intensivo (-76 ha), presentan cambios netos negativos. Las mismas han experimentado una mayor proporción de pérdidas con respecto a las ganancias que obtuvieron en el periodo analizado.

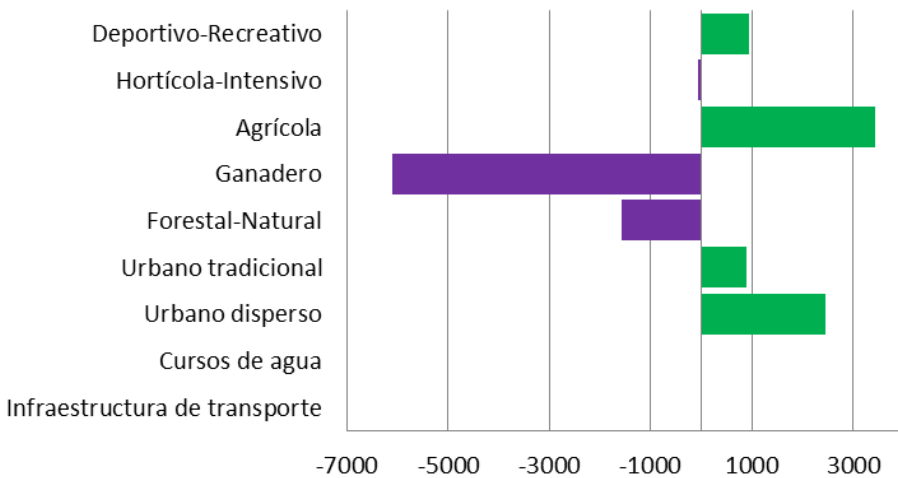


Figura 5. Cambio neto de usos del suelo entre 2000 y 2010.
Fuente: elaboración del autor.

La cartografía dinámica de los indicadores de cambios de usos del suelo nos permite avanzar en la descripción y análisis de los patrones de distribución espacial de cada categoría, destacando las superficies permanentes y aquellas que presentan mayor dinamismo a través del avance o retroceso de la superficie ocupada. La Figura 6 señala las superficies que han experimentado cambios desde el año 2000 al 2010.

La evolución espacial de la ocupación del suelo en el área de estudio se caracteriza por presentar tendencias de ocupación del suelo vinculadas a la interrelación del

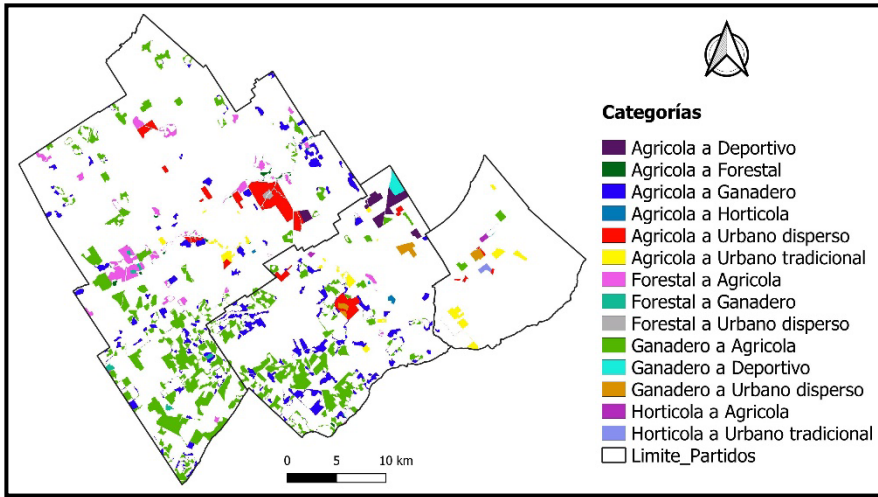


Figura 6: Cambios de usos del suelo entre 2000 y 2010.
Fuente: elaboración del autor.

espacio urbano y rural. En el primer caso, se ha dado un proceso de urbanización diferenciado a partir de la escala de actuación. Es así como se reconoce la expansión urbana en una escala local y regional, relacionada al crecimiento de las ciudades intermedias y a la dinámica generada por la aglomeración Gran Buenos Aires, respectivamente.

El uso Urbano presentó un incremento general de 3 362 ha. Los cambios experimentados por esta categoría se han dado bajo dos modalidades: la modalidad compacta con un aumento de 902 ha, que viene a extender las áreas urbanas preexistentes y la modalidad dispersa con un incremento de 2 461 ha, producto de 17 nuevas urbanizaciones cerradas, que se distribuyen, en su mayoría, en el partido de Luján. En el caso de la modalidad compacta, el avance se produjo sobre áreas antiguamente destinadas a la agricultura. En el partido de Moreno se puede observar el reemplazo de áreas destinadas a la producción hortícola. Al mismo tiempo, durante esta década, se ha observado el proceso de densificación de las áreas urbanas.

Por el otro lado, la modalidad dispersa fue la que experimentó los mayores cambios durante el período de estudio, siendo la más significativa en el proceso de urbanización del área de estudio. La expansión que se produjo sobre áreas destinadas a la producción agropecuaria y coberturas forestales consolida el patrón de ocupación que se experimenta, principalmente, desde la década anterior. Sumado a esto, el incremento de áreas destinadas al uso deportivo (946 ha), como la práctica de polo y golf,

en una zona de antigua dedicación agropecuaria, denota el cambio de funcionalidad de estas áreas periféricas, acrecentando su orientación residencial y de servicios.

La dinámica del espacio rural presenta la consolidación del proceso de agricultura en el área de estudio, siendo mayormente significativa en el partido de Luján seguido de General Rodríguez, donde la agricultura avanzó sobre áreas destinadas anteriormente a la ganadería. Si bien se produjo un notable intercambio de superficies entre estos dos usos del suelo, fue la agricultura la que obtuvo un cambio neto positivo. De esta manera, la actividad ganadera presenta una tendencia decreciente, con una pérdida neta de una superficie de 6 105 ha. El avance de la agricultura también se ha dado sobre coberturas naturales como bosque ribereño y monte implantado.

La actividad hortícola presenta una cierta estabilidad aunque con indicios de decrecimiento por el avance de la urbanización, lo que puede generar una localización más periférica de esta actividad productiva, principalmente en los partidos de General Rodríguez y Luján.

De este modo, se hace notar que el área de estudio ha experimentado notables cambios de usos del suelo, orientados principalmente por la expansión de urbanizaciones cerradas ligada a procesos de urbanización metropolitana y el avance de la agricultura sobre usos del suelo rurales como evidencia del proceso de agriculturización.

Conclusiones

El estudio de la dinámica de la ocupación del suelo mediante la incorporación de la dimensión temporal tiene como finalidad el descubrimiento de la variación espacio-temporal de los patrones de distribución espacial de las categorías de usos del suelo. El análisis y la modelización de estos cambios, posibilitado metodológicamente por el modelado cartográfico, aporta herramientas orientadas a la cuantificación de la magnitud y la distribución espacial de las categorías analizadas. De esta manera se procedió a la evaluación de los cambios a partir de insumos estadísticos y cartográficos, lo cual ha permitido realizar un análisis detallado de los cambios reales en la ocupación del suelo, especificando las superficies de ganancias, pérdidas, cambio neto y total, e intercambios.

En este sentido, cabe señalar la importancia de incorporar la metodología de detección de cambios en el estudio de la dinámica temporal en municipios que están sujetos a procesos de urbanización de gran dinamismo y aparición de conflictos ante cambios de usos del suelo. De este modo, la elaboración de cartografía temática a partir de técnicas de Teledetección y la aplicación metodológica mediante SIG permitieron la generación de conocimientos a un nivel espacial, en apoyo a la elaboración de un diagnóstico territorial de la evolución espacial de la ocupación del suelo, constituyéndose en una valiosa herramienta para el ordenamiento territorial a nivel urbano-regional.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo dan cuenta de la configuración socioespacial ligada al proceso de expansión metropolitana y los efectos generados sobre los espacios de la franja urbano-rural en los cuales avanza. La expansión urbana se encuentra relacionada al crecimiento de las ciudades intermedias y a la dinámica generada por la aglomeración Gran Buenos Aires, siendo la modalidad urbana dispersa la más significativa en el proceso de urbanización del área de estudio avanzando sobre áreas destinadas a la producción agropecuaria y coberturas forestales. A su vez se aprecia el incremento de áreas destinadas al uso deportivo-recreativo, que se encuentran asociadas a la existencia de urbanizaciones cerradas. Esto indica una clara tendencia de cambio de aquellas áreas antiguamente destinadas a las actividades agropecuarias por el uso residencial y de servicios.

Por otro lado, la dinámica del espacio rural evidencia un proceso de agriculturización que avanza sobre usos del suelo rurales, como la ganadería, y sobre coberturas del medio natural. Estos cambios detectados señalan el dinamismo que caracteriza a la ocupación del suelo en territorios de la periferia metropolitana.

Cabe concluir este trabajo señalando las líneas metodológicas que aportarán a la modelización del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo en una investigación futura. Entre ellas, la aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano y cambios de usos del suelo basados en la técnica de Automatas Celulares, cuya finalidad es la de construir diferentes alternativas de configuraciones espaciales futuras (escenarios), destacando un claro enfoque prospectivo de la Geografía hacia un desarrollo territorial sostenible. Por su parte, las técnicas de evaluación multicriterio amplían las posibilidades de trabajo hacia la obtención de resultados como escenarios de posibilidades prospectivas. La combinación de los modelos de simulación y técnicas de evaluación multicriterio utilizando SIG, permitirá la modelización de configuraciones espaciales futuras. Los procedimientos metodológicos explicitados generan información de base para la realización del diagnóstico espacial y la formulación de propuestas, que utilizadas en el ámbito de la gestión, serán de suma utilidad en el desarrollo sostenible de los municipios del área de estudio.

Bibliografía

- Aguilera Ontiveros, A. (2002). *Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*, El Colegio de San Luis, San Luis Potosí.
- Aguilera Benavente, F.; Plata Rocha, W.; Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2009). "Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos", *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, núm. 4, pp. 57-80.

- Arellano, B. y Roca, J. (2010). “El UrbanSprawl, ¿Un fenómeno de alcance planetario? Los ejemplos de México y España”, *Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 4(12):115-147.
- Barsky, A. (2005). “El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. Introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires”, *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, núm. 194, p. 36.
- Borsdorf, A. (2003). “Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana”, *EURE*, 29(86):37-49.
- Buzai, G.D. (ed.) (2010). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y metodológicos*, Universidad Nacional de Luján, Luján.
- Buzai, G.D. y Baxendale, C.A. (2006). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*, Lugar Editorial, Buenos Aires.
- Buzai, G.D.; Lanzelotti, S.; Humacata, L.; Principi, N.; Acuña Suárez, G. y Baxendale, C.A. (2017). “Análisis espacial y evaluación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Aplicación: la expansión urbana de Luján y los potenciales conflictos entre usos del suelo”, *Memorias XVI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*, Universidad del Azuay, Cuenca, pp. 245-252.
- Carter, H. (1983). *El estudio de la Geografía Urbana*, Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid.
- Chuvieco, E. (2007). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*, Ariel Ciencia, Barcelona.
- Eastman, R. (2012). *Guía IDRISI Selva. Land Change Modeler*, Clark Labs, Clark University, Worcester, USA.
- Gómez Delgado, M. y Rodríguez Espinosa, V.M. (2012). *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con tecnologías de la información geográfica*, Ra-Ma, Madrid.
- Henríquez Ruíz, C. (2014). *Modelando el crecimiento de las Ciudades Medias*, Ediciones UC, Santiago.
- Humacata, L. (2017). “Análisis espacial de los cambios de usos del suelo en partidos de interfase urbano-rural de la Región Metropolitana de Buenos Aires, en el periodo 2000-2010, mediante la aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica”, tesis de maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul.
- INDEC (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010*, Instituto Nacional de Estadística y Censos, Buenos Aires.

- Lara, B. (2014). "Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires mediante imágenes LANDSAT", tesis de maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul.
- Janoschka, M. (2002). "El nuevo modelo de la ciudad latinoamericana: fragmentación y privatización", *EURE*, 28(85):11-20.
- Linares, S. (2015). "Aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano", en Buzai, G.D.; Cacace, G.; Humacata, L.; Lanzelotti, S.L. (comps.) (2015), *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 1: Por una Geografía de lo real*, MCA Libros, Mercedes.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*, John Wiley and Sons, New York.
- Matteucci, S.; Morello, J.; Buzai, G.; Baxendale, C.; Silva, M.; Mendoza, N.; Pengue, W. y Rodriguez, A. (2006). *Crecimiento urbano y sus consecuencias sobre el entorno rural. El caso de la ecorregión pampeana*, Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.
- Phlipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*, Ariel, Barcelona.
- Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009). "Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000)", *Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona.
- Pontius, R.G.; Shusas, E. and McEachern, M. (2004). "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101: 251-268.
- Ramírez, L. y Pértile, V.C. (2013). "Cambio de uso de suelo y tendencias de la expansión urbana entre 1990 y 2030 en Juan José Castelli y Villa Ángela, Chaco, Argentina", *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 5(5):194-216. Disponible en: <<https://revistageosig.wixsite.com/geosig>>.
- Santos Preciado, J.M.; Azcárate Luxán, M.V.; Cocero Matesanz, D.; García Lázaro, F.J. y Muruguza Cañas, C. (2012). "Análisis detallado del crecimiento urbano mediante Tecnologías de la Información Geográfica", en Gómez Delgado, M.; Rodríguez Espinosa, V. M. (2012). *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con tecnologías de la información geográfica*, Ra-Ma, Madrid.
- Stamp, L.D. (1981). *Geografía Aplicada*, EUDEBA, Buenos Aires.
- Tapiador, F.J. (2001). "El papel del geógrafo en las directrices de ordenación territorial", *Boletín de la AGE-Asociación de Geógrafos Españoles*, 31:137-147.

Zonificación de las áreas propensas a incidentes por ataques de *Crocodylus acutus* en el Pacífico Central de Costa Rica utilizando un Sistema de Información Geográfico

Luis Fernando Sandoval Murillo*

Carlos Morera Beita*

Iván Sandoval Hernández**

Recibido 9 de octubre de 2018; aceptado 20 de diciembre de 2018

Abstract

In recent years, the incidence of attacks by crocodiles in Costa Rica has increased, which is associated with the development of human activities in areas considered as optimal in what I determine as the species' potential habitat. Given the above, the present investigation proposes the identification of zones of interaction between the crocodile and the human being from the integration of physical-geographic variables through Geographic Information Systems (GIS). In this way, a theoretical compilation was carried out to identify the physical-geographical variables that make up the crocodile's habitat (slope, drainage network, flood areas and land use coverage), as well as the socio-environmental variables that influence the alteration and loss of habitat of the species (number of neighborhoods, population density, density of roads, and coverage of land use). Likewise, case records were integrated with crocodiles assisted by the fire department. It was possible to demonstrate that most of incidents occur in areas with high interaction (areas where a wide variety of anthropic activities are carried out within the potential habitat of this reptile.) In addition, the results obtained in the investigation constitute an important input in the decision-making at the policy and territorial order level in the Central Pacific Region, since tourism is one of the main economic activities that can be threatened by an attack by this species.

* Académico, Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, correos electrónicos: luis.sandoval.murillo@una.cr, carlos.morera.beita@una.cr

** Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Costa Rica, correo electrónico: ivan.sandoval.hernandez@una.cr

Key words: *Geographical Information Systems (GIS)*, *Crocodylus acutus*, *habitat*, *alteration*, *interaction*.

Resumen

En los últimos años, la incidencia de ataques por cocodrilos en Costa Rica, se han incrementado, lo cual está asociado al desarrollo de las actividades humanas en áreas consideradas como óptimas en lo que determinó como hábitat potencial de la especie. Dado lo anterior, la presente investigación plantea la identificación de zonas de interacción entre el cocodrilo y el ser humano a partir de la integración de variables físico-geográficas por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). De esta manera, se realizó una recopilación teórica para la identificación de las variables físico-geográficas que integran el hábitat del cocodrilo (pendiente, red de drenaje, áreas de inundación y coberturas de uso de la tierra), así como las variables socio-ambientales que influyen en la alteración y la pérdida del hábitat de la especie (cantidad de poblados, densidad de población, densidad de caminos, y coberturas de uso de la tierra). Así mismo, se integraron los registros de casos con cocodrilos atendidos por el cuerpo de bomberos. Se logró evidenciar que la mayoría de incidentes se presentan en zonas con una alta interacción (áreas adonde se realizan una amplia variedad de actividades antrópicas), dentro del hábitat potencial de este reptil. Adicionalmente, los resultados obtenidos en la investigación constituyen un insumo importante en la toma de decisiones a nivel de política y ordenamiento territorial en la Región Pacífico Central, ya que en esta zona el turismo es una de las principales actividades económicas que puede llegar a ser amenazada por un ataque de ésta especie.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, *Crocodylus acutus*, *hábitat*, *alteración*, *interacción*.

Resumo

Nos últimos anos, a incidência de ataques por crocodilos na Costa Rica aumentou, e isso está associado ao desenvolvimento das atividades humanas em áreas consideradas como ótimas no que se definiu como hábitat potencial da espécie. Diante disso, a presente pesquisa propõe a identificação de zonas de interação entre o crocodilo e o ser humano a partir da integração de variáveis físico-geográficas por meio dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Desta maneira, se realizou uma recompilação teórica para a identificação das variáveis físico-geográficas que integram o habitat do crocodilo (inclinações, rede de drenagem, áreas de inundação e coberturas de uso da terra), assim como as variáveis sócio-ambientais que influem na alteração e perda do habitat da espécie (quantidade e densidade de população, densidade de caminhos, e coberturas e uso da terra). Assim mesmo, se integraram os registros de casos com

crocodilos atendidos pelo corpo de bombeiros. Evidencia-se que a maioria dos incidentes se apresentam em zonas com uma alta interação (áreas onde se realizam uma ampla variedade de atividades antrópicas), dentro do habitat potencial deste réptil. Adicionalmente, os resultados obtidos na pesquisa constituem um insumo importante na tomada de decisões a nível político e ordenamento territorial na Região do Pacífico Central, já que nesta zona o turismo é uma das principais actividades económicas que pode chegar a ser ameaçado por um ataque desta espécie.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, *Crocodylus acutus*, *habitat*, *alteração*, *interação*.

Introducción

El cocodrilo americano (*Crocodylus acutus*) se distribuye en ambas costas del continente americano, desde el sur de México hasta el norte de Suramérica. En Costa Rica, se reportan habitando ríos, lagos, pantanos, esteros, manglares, en elevaciones menores a los 700 msnm y en el mar en áreas cercanas a las costas (Bolaños *et al.*, 1995). El Pacífico Central agrupa una de las mayores poblaciones de *C. acutus*, influenciado por una densa red de drenaje, la presencia de 16 cuencas hidrográficas de las 34 de mayor importancia que tiene el país, tales como: Bongo, Lagarto, Guacimal, Aranjuez, Barranca, Jesús María, Grande de Tárcoles, Tusubres, Parrita, Damas, Naranjo, Savegre y Barú.

Durante la década de los sesenta en Costa Rica, la intensa cacería generó que la especie fuera categorizada por la legislación nacional e internacional en peligro de extinción, medida que influyó en una progresiva recuperación de sus poblaciones. Éste incremento provocó la recolonización de sus antiguos hábitats, y acompañado de la ausencia de mapas de zonificación que impliquen restricciones o regulaciones para las actividades antrópicas, se generó un aumento de incidentes entre poblaciones humanas y cocodrilos, potencializados por factores como el cambio en la cobertura de uso de la tierra, vinculados a la invasión del hábitat natural de este reptil, así como al uso de las áreas de protección de ríos y quebradas por actividades agrícolas, situación que ha generado deterioro y reducción de sus principales fuentes de alimento, así como la disminución de los caudales de los ríos en la época seca o por la presencia de fenómenos climáticos que alteran su entorno natural, propiciando mayores interacciones entre humano-cocodrilo (García y Buenrostro, 2015).

A inicios de la década de los noventa, se identifica una mayor presencia de cocodrilos en sus zonas de distribución, así como un aumento de ataques hacia los seres humanos en los ríos Bebedero, Cañas, Tempisque y algunos ríos del Pacífico Central, estos incidentes se han asociado a la relación directa entre los seres humanos y el cocodrilo, producto probablemente de la invasión de su hábitat (Bolaños, 2012). En

la actualidad, estas relaciones persisten debido al amplio desarrollo de actividades antrópicas asociadas a las vías de comunicación, crecimiento de la población, expansión residencial concentrada y dispersa, la cantidad de centros poblados por km², así como las actividades agropecuarias (cultivos-pasto) en áreas costeras, en márgenes de ríos, esteros y cuerpos de agua. Dichas actividades han generado la alteración del medio natural afectando el hábitat de la especie y potencializando la interacción con el ser humano.

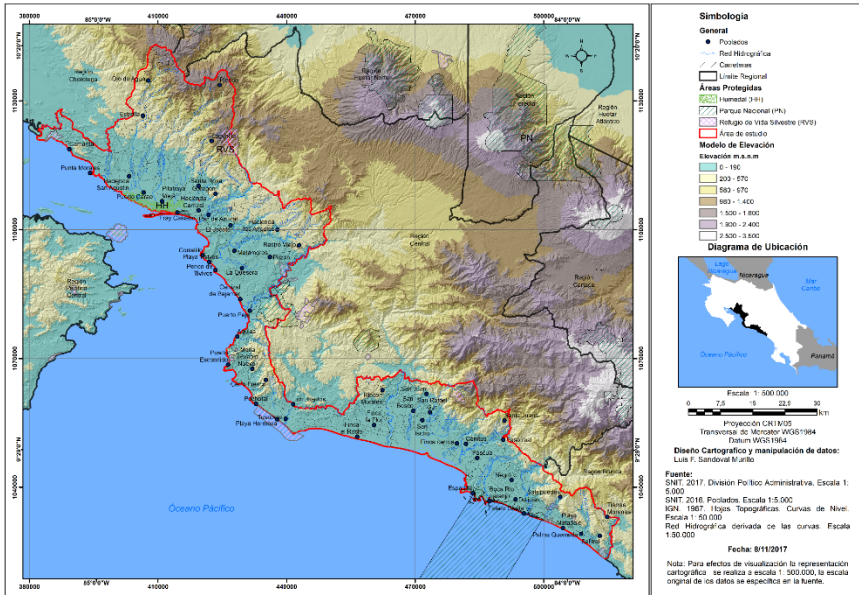
Considerando esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo identificar las áreas propensas a incidentes por ataques de cocodrilos (*Crocodylus acutus*) en el Pacífico Central de Costa Rica, para la identificación del nivel de amenaza, a partir de un Sistema de Información Geográfica. Donde se valoran aspectos físicos-geográficos, características del hábitat de la especie, así como las condiciones socio-ambientales relacionadas a la alteración de su entorno y el nivel de exposición de los seres humanos a la presencia de esta especie. Lo anterior, abordado desde la geografía, la cual como ciencia tiene como objeto de estudio el espacio y las relaciones sociedad-naturaleza, aportando en investigaciones concretas para la resolución de los problemas socio-ambientales, basado en técnicas como los Sistemas de Información Geográfica y los Sensores Remotos, por medio del modelaje de variables espaciales y su representación cartográfica.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la región Pacífico Central, creada mediante Decreto 16068-PLAN de febrero de 1985, que comprende los cantones de la provincia de Puntarenas: Esparza, Montes de Oro, Aguirre, Parrita, Garabito y Puntarenas, así como los de San Mateo y Orotina pertenecientes a la provincia de Alajuela. Se delimita por las coordenadas geográficas extremas 9° 19' 00" y 10° 9' 28" latitud norte; 83° 57' 36" y 85° 06' 20", longitud oeste y las coordenadas métricas 382147 – 1123411 y 514551 – 1023484. Según la regionalización del SINAC la administración de la Región Pacífico Central, pertenece al Área de Conservación Pacífico Central (ACOPAC) (Mapa 1). En el presente estudio no se considera los distritos de Lepanto, Paquera e Isla Chira.

Las condiciones climáticas del Pacífico Central, de acuerdo con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, sf), se caracterizan por presentar el régimen de precipitación del Pacífico. Su posición geográfica al suroeste del país, con la protección al norte de cadenas montañosas impiden la incursión de vientos alisios del noreste, estableciéndose una modificación de este régimen del Pacífico, dando origen a la presencia de dos estaciones marcadas como el clima tropical seco, con una estación seca corta y moderada desde enero a marzo y un período lluvioso muy severo y largo dividido en dos períodos; el primero de mayo a agosto y el segundo de septiembre a octubre. Mientras que los meses de abril y diciembre están marcados como los meses

de transición. La precipitación promedio de la zona es de 3500 mm anuales y la temperatura máxima promedio es de 31.0 °C y la mínima promedio es de 22.7 °C.



Mapa 1. Ubicación del área de estudios, Pacífico Central.

Se caracteriza por un sistema fluvial, perteneciente a la vertiente del Pacífico, donde sobresalen ríos como el Tárcoles, Jesús María, Guacimal y Aranjuez. Mismos que han configurado su geomorfología dando origen a extensas llanuras, en que se desarrollan actividades como la agricultura y la ganadería, sobresaliendo las llanuras del Tárcoles y Parrita (Astorga, sf).

Metodología

En esta investigación se identificaron dos escenarios, el primero referido al hábitat potencial del cocodrilo americano (*C. acutus*), considerando elementos físico-geográficos como la altitud, red de drenaje, áreas de inundación y la delimitación de las áreas de manglar, ríos anchos y desembocaduras. El segundo escenario correspondiente a todas las actividades concernientes a la alteración del hábitat donde se consideraron elementos socio-ambientales como: densidad de las vías de comunicación, densidad de poblados, cantidad de población por distrito, coberturas de uso de la tierra (asentamientos, cultivos y pastos). A partir de los cuales se deriva la generación de las áreas de interacción entre el ser humano y este reptil, proceso que se describe a continuación:

En la realización del primer escenario se elaboró el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir de la capa vectorial de curvas a escala 1:50 000. Posteriormente, se realizó un proceso de interpolación para la obtención del MDE con la herramienta de *interpolation / topo to raster* del ArcGis, el cual es definido por ESRI como un método de interpolación diseñado específicamente para crear modelos digitales de elevación (DEM) hidrológicamente correctos, el cual está basado en el programa ANUDEM, desarrollado por Hutchinson en el periodo 1988-2011. Una vez realizado el MDE se deriva la red de drenaje, con la aplicación de Hydrology del ArcGIS, la cual se usa en la delimitación de cuencas hidrográficas, con el fin de que los cauces de los ríos y quebradas coincidan con el MDE y evitar el desplazamiento de las capas de ríos existentes. Con la generación de la red hídrica en el área de estudio se utilizó la aplicación de density/Kernel Density, para estimar la densidad de ríos por km², con el fin de facilitar la integración de las variables posteriormente, cada una es clasificada en tres categorías (alta, media y baja) utilizando la clasificación igualitaria por intervalo.

Se consideraron las áreas de inundación correspondientes a la demarcación oficial realizada por la Comisión Nacional de Emergencias, las cuales se ajustaron al MDT para evitar desplazamiento. A las áreas que no presentaban riesgo de inundación se asignaron valores de cero. Otra de las variables identificadas a partir de la literatura existente para el hábitat del cocodrilo son las coberturas de manglares, cauces de ríos, desembocaduras y cuerpos de agua, que fueron identificadas utilizando imágenes RapidEye a escala 1:25 000, mediante la técnica de fotointerpretación y las herramientas de edición del programa ArcGis 10.5. Una vez identificadas y procesadas las capas en formato vectorial se procede a su integración para la obtención del hábitat potencial del cocodrilo.

Para el segundo escenario, relacionado a la alteración del hábitat por actividades humanas se procesaron las capas vectoriales: red de caminos para generar un ráster de densidad de caminos en km², con base a la metodología implementada por Ramírez, Jiménez y Martínez (2005), la cual consiste en la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para realizar el análisis de la estructura y de la densidad de la red caminos. Esta última definida como el promedio de la longitud total de caminos por unidad de área (km/km²). Específicamente, se utilizó la extensión Density Kernel, procesamiento aplicado a la capa vectorial de poblados con el fin de generar áreas continuas para su posterior análisis.

La identificación de las coberturas de uso de la tierra que muestran el desarrollo de actividades humanas se elaboró utilizando las imágenes satelitales LandSat con una resolución espacial de 30 metros para los años 2000 y 2015. Adicionalmente, se aplicó una corrección radiométrica y atmosférica, la cual, según Ambrosio *et al.* (sf), es necesaria para modelar adecuadamente parámetros físicos realistas y consistentes,

al abordar estudios multi-temporales, mismos que facilitan el proceso de clasificación supervisada y de fotointerpretación. Las categorías de uso identificadas se definen en la Tabla 1.

Tabla 1
Definición de las categorías de uso de la tierra

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
Bosque en pendiente alta	Cobertura vegetal dominada por árboles de copas anchas y casi continuas, en pendientes mayores a 30%
Bosque en pendiente baja	Cobertura vegetal con la presencia de elementos arbóreos y arbustivos con copas menos continuos. Han sido intervenidas y se encuentran en regeneración, en pendientes menores a 30%
Pasto en pendiente alta	Supresión total de los bosques por perturbaciones humanas y sustitución por gramínea para ganadería intensiva en pendientes mayores al 30%
Pasto en pendiente baja	Supresión total de los bosques por perturbaciones humanas y sustitución por gramínea para ganadería intensiva en pendientes menores al 30%
Manglar	Bosques pantanosos que ocupan espacios con alta sedimentación donde se mezcla el ambiente marino y el terrestre
Cuerpos de agua	Áreas de lagos, lagunas y del curso de agua (río principal y tributarios)
Cultivos	Son áreas con ocupación agrícola que puede ser permanentes o estacionales
Asentamientos humanos	Están representados por la ocupación urbano-residencial dispersa, acompañado de servicios públicos institucionales, industrial, comercial

Fuente: adaptado de Morera y Sandoval, 2015.

Con la realización de cada una de las variables del primer y segundo escenario, se realizó la clasificación de cada una de las capas, donde cada uno de los valores se normalizaron, lo cual consiste en la estandarización de los pesos asignados mediante el método de máximo de lista, que se fundamenta en dividir el peso de cada registro asignado entre el valor máximo de los pesos por cada una de las categorías, obteniendo así un valor normalizado para cada registro, que oscila en un rango de 0 a 1 (Submitted, Fulfillment, y Kong, 2010). Siendo 1 el valor óptimo y 0 el menos óptimo para cada una de las variables a relacionar.

$$x'_i = x_i/x_{max} \quad (1) \text{ Normalización por máximo de lista}$$

Una vez realizada la normalización se establecieron tres grupos de categorías por valor, según los pesos normalizados asignados a cada variable y clasificados en tres rangos: alta, moderada y baja. Una vez determinados los rangos se relacionan por medio de un álgebra de mapas (suma), utilizando la media o promedio correspondiente a la suma de todas las puntuaciones de la variable dividida por el número total de casos, Fierro (2010). Obteniendo dos modelos espaciales, los cuales son representados cartográficamente, relacionados al hábitat potencial (topografía, red de drenaje y coberturas de uso de la tierra) y el mapa de la alteración del hábitat (la densidad de caminos, densidad de población y la distancia a centros poblados). Con la generación de ambos modelos, se procede a establecer la relación entre ambos para determinar cuáles son los sectores que representan mayor interacción entre el ser humano y el cocodrilo, utilizando el mismo método descrito anteriormente, por lo que se constituye la siguiente clasificación para los mapas de hábitat potencial y alteración del hábitat, Tabla 2.

Tabla 2
Normalización del hábitat potencial y alteración del hábitat

<i>Hábitat potencial</i>		
<i>Clasificación</i>	<i>Peso</i>	<i>Normalización</i>
Alta	3	1
Moderada	2	0.66
Baja	1	0.33
<i>Alteración del hábitat</i>		
<i>Clasificación</i>	<i>Peso</i>	<i>Normalización</i>
Alta	3	1
Moderada	2	0.66
Baja	1	0.33

Fuente: elaboración propia.

Con la generación de los dos escenarios descritos, se desarrolló el mapa de interacciones entre el ser humano y el cocodrilo, donde se realizó el mismo procedimiento descrito en el hábitat potencial y alteración del hábitat, donde la integración de los valores se agrupó en tres categorías como se muestra en la Tabla 3.

Con la realización de las zonas de interacción entre ambas especies se evidencian los incidentes con cocodrilos, atendidos y registrados por el cuerpo de bomberos para el periodo 2007-2017, los cuales eran los únicos registros que contenían una localización espacial.

Tabla 3
Zonas de interacción entre el cocodrilo y el ser humano

<i>ID</i>	<i>Rango de la sumatoria</i>	<i>Categorías</i>
1	0.33 - 0.495	Baja
2	0.4951 - 0.665	Media
3	0.6651 - 1	Alta

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Dinámicas ecológicas y hábitat del cocodrilo

La distribución de los cocodrilos se encuentra influenciada por elementos como la altitud, la hidrografía, el tipo de cobertura y la presencia de áreas de inundación, lo cual, de acuerdo con Bolaños, Sánchez y Piedra (1995), son condiciones que delimitan su hábitat a sectores específicos, abarcando principalmente áreas de manglar, ríos anchos y caudalosos. Todas estas prevalecen en el Pacífico Central en ríos como: Jesús María, Tivives y El Grande de Tárcoles. Adicionalmente, la distribución y densidad de los individuos puede afectarse por los patrones de migración o dispersión que estos efectúan, principalmente durante la época de apareamientos, comprendida, en general, de agosto a diciembre, meses que se catalogan como los más peligrosos, ya que los machos dominantes desplazan a los machos subordinados a hábitats de baja calidad (sitios sin hembras, con baja cobertura boscosa, con cercanía a poblados, zonas de ríos angostos y contaminados), llegando estos animales a áreas donde normalmente no se encuentran fuera de la época reproductiva. Esta situación, potencia la interacción entre los seres humanos y la especie (Sandoval, 2016).

Por otra parte, durante la época lluviosa, comprendida entre mayo a noviembre, los cocodrilos tienden a distribuirse aleatoriamente por cuerpos de agua que se forman durante fuertes precipitaciones y, posteriormente durante la época seca tienden a localizarse en los cauces principales de ríos o lagunas que mantienen agua aún durante la ausencia de precipitación. De la misma manera, cuando el río baja su nivel y/o se extrae gran cantidad de agua, muchos cocodrilos encuentran sus espacios en canales de riego o estanques de las empresas que se dedican a actividades de cultivo de peces y actividades agrícolas (Sánchez, 2001a). Con respecto a su densidad, en Costa Rica se han encontrado abundancias relativas por km² de nueve cocodrilos en los ríos Tempisque, cinco en el Tárcoles y cinco en el Terraba-Sierpe, asimismo se han observado en sitios donde normalmente no se les encontraba. Sin embargo, no existe un censo de la cantidad de individuos por hábitat, por lo cual es erróneo referirse a una sobrepoblación de la especie (Estado de la Nación, 2008).

Sin embargo, la invasión del hábitat del cocodrilo perturba el comportamiento normal de la especie, porque a pesar de ser animales muy resistentes, son vulnerables a los constantes cambios de la cobertura de uso de la tierra, producto de las actividades antrópicas (mismas que invaden su hábitat, incidiendo en la destrucción de la vegetación, alteración y modificación de los márgenes de los ríos), afectando los sitios de postura, asoleo, y distribución en general de la especie. Además, producto de la interacción con humanos se destruyen las cuevas que utilizan los animales para ocultarse del peligro o, eventualmente descansar o guardar alimento. Es muy importante señalar la afectación del comportamiento propio de la especie, producto de actividades turísticas en áreas de su distribución. De esta manera, la dinámica mencionada incide en la variación de las características y condiciones de su hábitat, los animales están obligados a migrar a otros sitios donde las condiciones naturales les ofrezcan protección y alternativas para sus actividades de descanso, asoleo, alimentación, protección y anidamiento (Sánchez, 2001b).

Sandoval y Bolaños (2016) argumentan que la fragmentación del paisaje en los últimos años en la región Pacífico Central y el Gran Humedal Tempisque está relacionada con una mayor interacción entre el cocodrilo y el ser humano, características que están determinadas por la distribución espacial, la forma, el tamaño del fragmento y el grado de conectividad entre las unidades de paisaje, acciones que generarían consecuencias como pérdida y reducción del hábitat de la especie. Además, ésta fragmentación incrementa la presencia de especies generalistas como ratas (*Rattus*), pizotes (*Nasua Narica*), mapaches (*Procyon lotor*), zorros pelones (*Didelphis virginiana*), así como espacios con alta densidad humana con frecuencia de animales domésticos como perros, gatos, gallinas, cerdos, entre otros que pueden convertirse en presa fácil para los cocodrilos (Cortijo, sf).

Con respecto al hábitat potencial del cocodrilo, son diversos los factores que se relacionan para la determinación del mismo como: la altitud menor a los 700 msnm, la presencia de áreas de manglar, acompañada de ríos caudalosos y anchos, la existencia de playones, así como las áreas de inundación mismas que funcionan de medio de desplazamiento durante la crecida de los ríos en presencia de fuertes precipitaciones o fenómenos atmosféricos prolongados, todos son un conjunto de variables que posibilitan la demarcación de su hábitat espacial dentro de un territorio, para el caso de la Región Pacífico Central se estableció la presencia de áreas propensas a la presencia del cocodrilo, como se refleja en el Mapa 2 y la Tabla 4, donde se muestra la distribución espacial del hábitat potencial en tres sectores contemplados como; alto, medio y bajo.

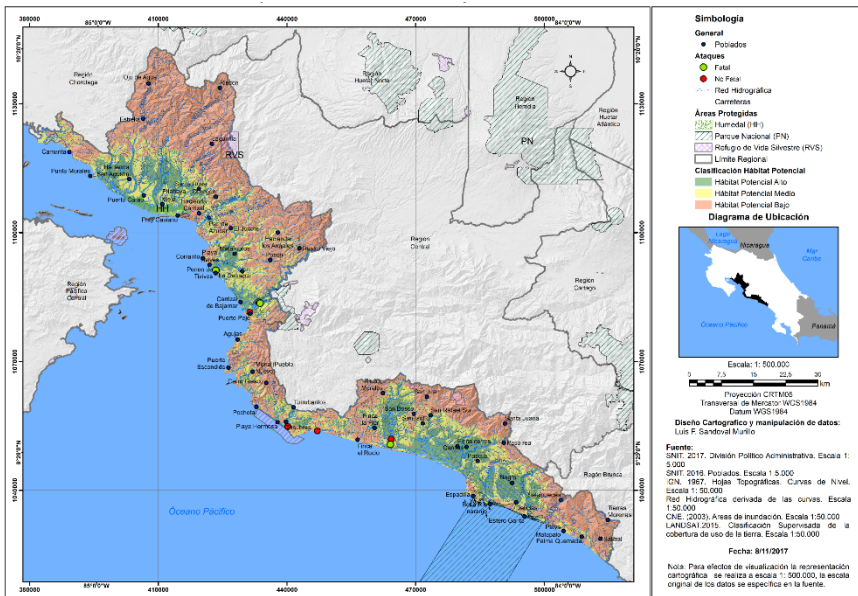
El hábitat potencial alto se caracteriza por elementos como cuerpos de agua, una alta densidad de la red de drenaje (1 862-3 053 km²), donde se destacan ríos importantes como el Jesús María, Tivives y El Grande de Tárcoles, además de manglares, esteros,

elevaciones menores a los 240 msnm, y áreas propensas a inundaciones, representando el 21.5% del Pacífico Central. Estas condiciones posibilitan la presencia del cocodrilo, debido a que pueden reunir las variables óptimas características de su hábitat, que de acuerdo con Bolaños, Sánchez y Piedra (1995) son condiciones que delimitan su hábitat a sectores específicos, abarcando principalmente áreas de manglar, ríos anchos y caudalosos. Todas estas condiciones que prevalecen en ríos como el Grande de Tárcoles y en el Jesús María.

Tabla 4
Región Pacífico Central, Clasificación del hábitat potencial y superficie

Clasificación hábitat	Hectáreas	Porcentaje
Hábitat Potencial Alto	59 484.0	21.5
Hábitat Potencial Bajo	117 781.4	42.5
Hábitat Potencial Medio	99 658.0	36.0
Total	276 923.4	100

Fuente: elaboración propia.



Mapa 2. Hábitat potencial del *Crocodylus acutus*, Pacífico Central Costa Rica.

Con respecto al hábitat potencial medio, se presenta una moderada densidad de ríos por km² entre 1 196-1 861 km², donde se da la presencia de coberturas de uso de la tierra como pasto y bosque en pendientes moderadas, cuerpos de agua, cultivos y elevaciones entre 234-466 msnm, representando un 42.5 % de la Región (Mapa 2). Estas condiciones son poco viables para la presencia del cocodrilo, ya que no presentan las características necesarias para su hábitat. Con respecto al hábitat potencial, las posibilidades de la presencia del cocodrilo van de escasas a nulas, debido a que las condiciones de esta categoría muestran una insuficiente densidad de la red de drenaje por km² (0.074-1.195), nula presencia de cuerpos de agua y manglares, y pendientes superiores a los 467 msnm. Abarcando una superficie de un 36% de la región.

Alteración del hábitat potencial del cocodrilo

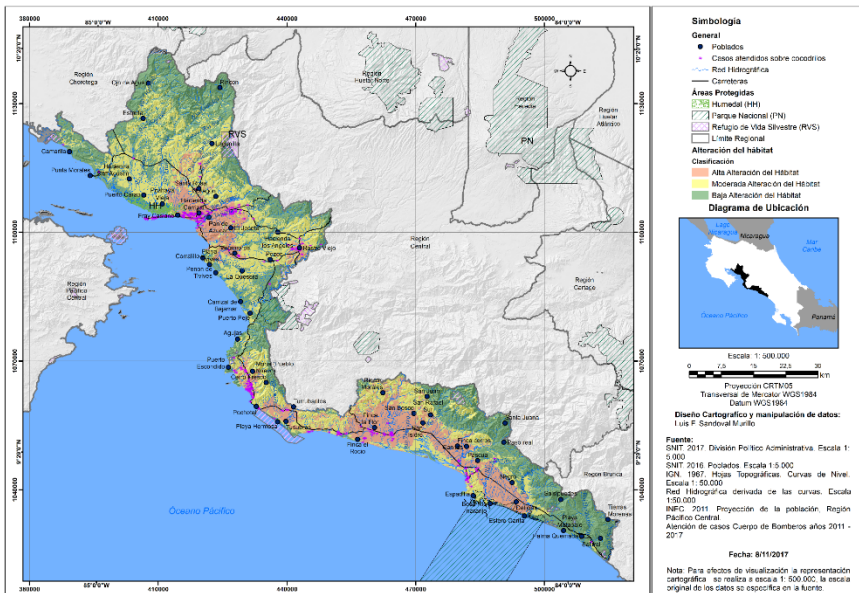
La integración de las variables antrópicas que constituyen la alteración del medio, producto de su desarrollo sobre el espacio geográfico, se vinculan a el aumento en la infraestructura y actividades como: vías de comunicación (densidad por km²), crecimiento de la población por distrito, asociado a la expansión residencial concentrada y dispersa, actividades agropecuarias y la cantidad de centros poblados por km² en el PC. Condiciones que se reflejan en investigaciones realizadas por Bolaños (2011), donde se evidencia la invasión y alteración del hábitat del cocodrilo en las últimas décadas, producto del crecimiento demográfico, el avance de la frontera agrícola, la presión urbana, la construcción y mejoramiento de la red vial, consecuentemente, con la generación de la fragmentación de los ecosistemas. Su combinación espacial permite visualizar la agrupación de actividades en el territorio y relacionarlo con el grado de alteración del hábitat potencial del cocodrilo en el Pacífico Central.

La Tabla 5, muestra las áreas de alteración por el desarrollo de actividades humanas en la región, donde un 20.4% presenta alta alteración de las condiciones naturales, producto del dinamismo de cultivos, áreas residenciales dispersas, distritos con una alta cantidad de habitantes como el Roble, Chacharita, Jaco y Parrita, mismos que reúnen una alta densidad de vías por km², entre 1.56-2.33, así como una alta densidad de poblados. Con respecto al hábitat potencial delimitado anteriormente, el porcentaje de alteración corresponde a un 8.47%, evidenciando una alta degradación, lo que incrementa la interacción entre el cocodrilo y el ser humano (Mapa 3), producto del rápido crecimiento y establecimiento de asentamientos humanos en las últimas décadas, atribuido a políticas de desarrollo agropecuario que propiciaron la demanda de tierras, ocupando las llanuras de inundación, esteros y lagunas costeras, las cuales son habitadas por el *Crocodylus acutus* (García y Buenrostro, 2015).

Tabla 5
Alteración del hábitat potencial del cocodrilo americano

<i>Alteración hábitat región</i>		
<i>Clasificación</i>	<i>hectáreas</i>	<i>porcentaje</i>
Alta alteración del hábitat	55913.96	20.44
Baja Alteración del hábitat	110718.42	40.47
Moderada alteración del hábitat	106973.39	39.10
<i>Total</i>	<i>273605.77</i>	<i>100</i>
<i>Alteración hábitat potencial</i>		
<i>Clasificación</i>	<i>hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Alta alteración del hábitat	23187.71	8.47
Moderada alteración del hábitat	22619.32	8.27
Baja alteración del hábitat	12206.53	4.46
<i>Total</i>	<i>58013.56</i>	<i>100</i>

Fuente: elaboración propia.



Mapa 3. Alteración del hábitat potencial del cocodrilo, Pacífico Central Costa Rica.

La superficie ocupada por una moderada alteración del hábitat corresponde a un 40% para la totalidad de la región, considerando únicamente la alteración del hábitat potencial alto de la especie, representa un 8.27%, producto de la presencia de actividades humanas de forma no intensificada, pero que de igual forma influye en la alteración del entorno natural, conllevando a la interacción directa con la vida silvestre. Con respecto a las áreas de baja alteración, estas corresponden a sectores con una fuerte irregularidad del terreno, que imposibilitan la presencia de actividades humanas, las que representan un 40.47% del Pacífico Central y un 4.46% del hábitat potencial de la especie, en el primer caso, por sus características geomorfológicas imposibilitan la presencia del cocodrilo.

Zonas de interacción entre el ser humano y el cocodrilo

La realización de este apartado se fundamentó en la modelización del hábitat potencial abordado anteriormente, considerando las condiciones óptimas para la presencia de *C. acutus*, a partir de la relación de las variables que caracterizan su hábitat, como elevaciones menores a los 700 msnm, una alta densidad de la red hidrográfica, la presencia de manglar, playones de río y áreas propensas a inundaciones (Bolaños, 2002). En este aspecto es significativo resaltar lo establecido por Santillán (2013), cuando se realiza la modelación de la distribución de una especie, cuando afirma que la presencia de todas las variables ambientales óptimas en un determinado hábitat no garantiza la existencia efectiva de la especie. Asociando la dispersión a factores reproductivos de la especie, así como las alteraciones generadas por las actividades humanas que inciden en la fragmentación ecosistémica y constituye barreras geográficas.

De acuerdo con Sandoval, Morera y Sandoval (en prensa), el hábitat potencial del cocodrilo en el Pacífico Central durante el periodo 2000-2015 ha experimentado cambios de uso y la fragmentación de su paisaje en coberturas como el manglar, cuerpos de agua y bosque, presentándose un incremento en el número de fragmentos asociados a una reducción en su superficie. Lo anterior es resultado de la alteración y la presión a la que han sido sometidas estas coberturas en áreas consideradas como óptimas para la presencia del cocodrilo, producto del desarrollo de actividades antrópicas. Dinámicas que se evidencian en los últimos años a partir de reportes de periódicos, atención de casos por Bomberos, reportes al servicio 911 y registros realizados por asociaciones como CrocBITE, así como recopilaciones de casos por investigadores como Bolaños (2017).

A partir de la combinación del hábitat potencial y las áreas de interacción por actividades humanas, considerando únicamente los sectores determinados como hábitat potencial alto para el cocodrilo, se obtuvo la representación espacial de las zonas que presentan la posibilidad de una mayor interacción entre el ser humano y el cocodrilo, misma que podría potenciar el encuentro entre ambas especies, que tal como lo

menciona Andrade (2013) se han incrementado en los últimos 40 años, potencializado por las actividades antrópicas en áreas naturales donde habita el cocodrilo.

La Figura 1, muestra las áreas de alta interacción entre el ser humano y el cocodrilo en el Pacífico Central con un 20.44% de su superficie, de la cual un 6.5%, se localiza dentro del hábitat potencial alto de la especie (Mapa 4), donde se desarrollan actividades antrópicas con una alta concentración como densidad de carreteras por km², cantidad de población, densidad de poblados por km² y amplio desarrollo de actividades agrícolas y turísticas. De acuerdo con Bolaños (2002), la alteración del hábitat del cocodrilo se ve afectada por el incremento y desarrollo de vías de comunicación, las cuales influyeron en el acrecentamiento del tránsito de personas en diferentes lugares, y un lógico aumento de la población humana, derivando en el surgimiento y expansión de asentamientos antrópicos, en detrimento de las áreas silvestres, incidiendo en la fragmentación de los ecosistemas. Por otra parte, el amplio desarrollo antrópico que se refleja en los datos expuestos anteriormente y la atención de casos por parte del cuerpo de bomberos entre el periodo 2007-2017, colaboran con lo obtenido en la zonificación de las áreas de interacción entre ambas especies. Además, coinciden con los sitios donde se han registrado más accidentes por cocodrilos, relacionados con el río Parrita, y en áreas cercanas al mar, sobresaliendo ataques en playa Esterillos, ambas áreas que concuerdan con las zonas de alta interacción.

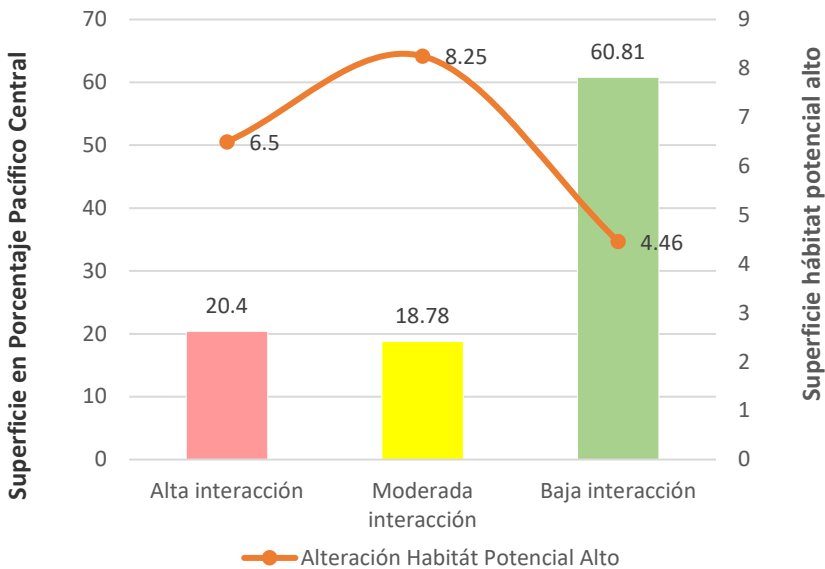


Figura 1. Pacífico Central: zonas de interacción entre el ser humano y *Crocodylus acutus*.

Las zonas de moderada interacción abarcan un 18.78% del Pacífico Central, sin embargo, dentro de las condiciones moderadas para la presencia del cocodrilo se representa un 8.25%, en distritos como: Savegre, Quepos, Parrita, Tárcoles, Pithaya, Chomes y Manzanillo (Mapa 4). Con respecto a las zonas de baja interacción, esta corresponde a sectores donde aún se conservan las condiciones naturales como manglares y la presencia de las actividades antrópicas son escasas o nulas correspondiendo a un 60.81% en la totalidad del área de estudio y constituye un 4.46% en el hábitat potencial de la especie. La Figura 2 muestra la cantidad de casos atendidos en las zonas de interacción entre ambas especies, donde la mayor cantidad de casos se registran en zonas con una alta interacción entre el periodo 2011-2017, destacando el año 2012 con la mayor cantidad de atenciones con un total de 114, el 2014 registra la atención de 22 casos y los años 2015 y 2016 un total de 28, con respecto al 2017 la disponibilidad de los datos son registrados al mes de julio, por lo que se muestra una disminución de los casos atendidos (16). Lo anterior, según lo expresado por Magaña *et al.* (2010), quienes indican que la ocurrencia de ataques de cocodrilos, sin provocación de los humanos, responden a la defensa territorial, defensa de nidos y/o crías, caza para alimentación, confusión de identidad o humano como objetivo secundario y autodefensa.

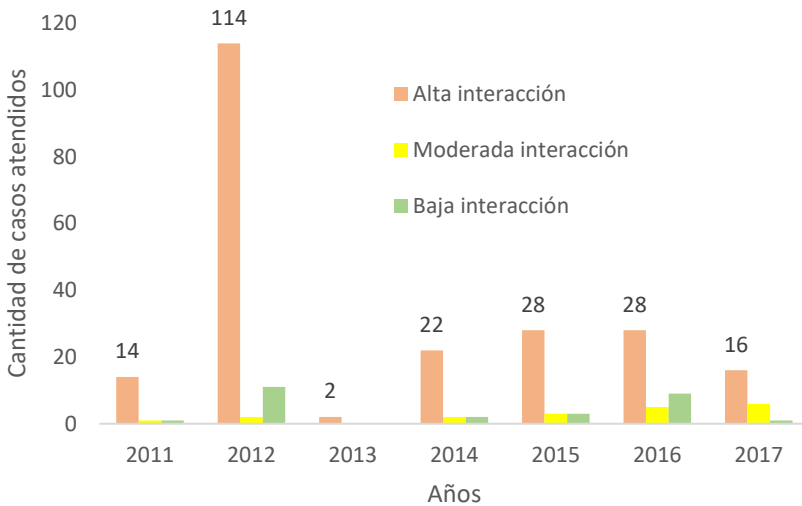
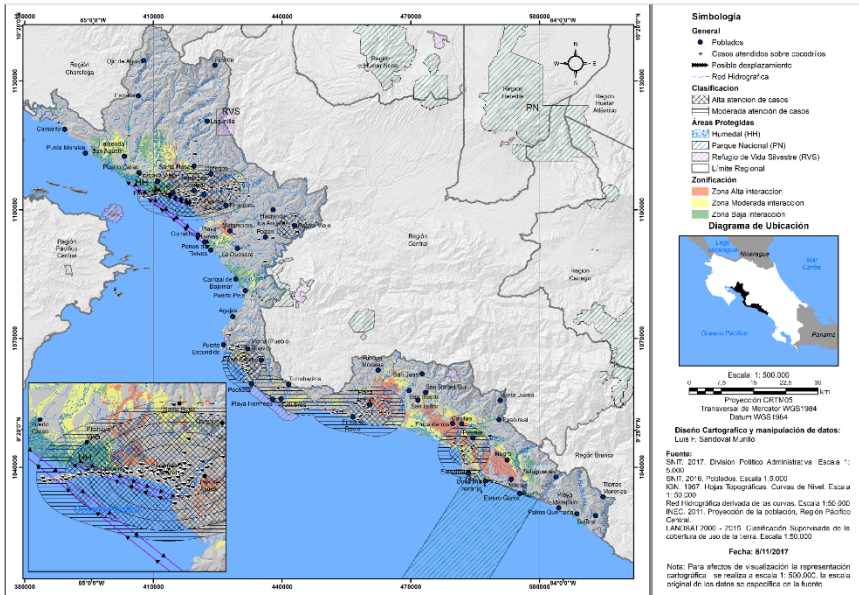


Figura 2. Pacífico Central: cantidad de casos atendidos según zona de interacción.

En la Tabla 6 se muestran los poblados que se localizan en las zonas de alta interacción catalogados como hábitat potencial del cocodrilo, los cuales se ubican dentro de los distritos de Quepos (Delicias, Damas, San Rafael y otros), Parrita (Pueblo

Nuevo, San Isidro, Playa Sur y Julieta), Jaco (Turrubaritos), Ceiba (Machuca y Matamoros), Barranca (Sitio Junta) y San Juan Grande (Jesús María). La presencia de esta diversidad de poblados en sectores donde se reúnen las condiciones óptimas para la presencia de la especie constituye una zona de alto potencial de interacción entre el ser humano y el cocodrilo, el cual podría aumentar la atención de casos y efectos negativos hacia la población antrópica.



Mapa 4. Zonas de interacción entre el ser humano y el *Crocodylus acutus*, Pacífico Central Costa Rica.

Tabla 6
Poblados ubicados en las zonas de alta interacción en el hábitat potencial del *Crocodylus acutus*

<i>Tipo de poblado</i>	<i>Nombre Poblado</i>	<i>Distrito</i>	<i>Tipo de poblado</i>	<i>Nombre Poblado</i>	<i>Distrito</i>
Poblado	Delicias	Quepos	Cabecera de cantón	Parrita	Parrita
Poblado	Mona	Quepos	Barrio	Pueblo Nuevo	Parrita
Hacienda/finca	Finca Pastora	Quepos	Poblado	Cabas	Quepos
Hacienda/finca	Finca Llorona	Quepos	Poblado	Pirras (Las Parcelas)	Parrita
Poblado	Llorona	Quepos	Barrio	Julieta	Parrita

Continuación Tabla 6

Poblado	Roncador	Quepos	Poblado	Pocares	Parrita
Hacienda/ finca	Finca Roncador	Quepos	Poblado	Tigre	Parrita
Poblado	Bartolo	Quepos	Poblado	San Rafael Norte	Parrita
Poblado	Llamaron	Quepos	Poblado	Jicote	Parrita
Hacienda/ finca	Finca Bartolo	Quepos	Poblado	Teca	Parrita
Poblado	Managua	Quepos	Poblado	Sardinal Sur	Parrita
Poblado	Junta Naranjo	Quepos	Poblado	Quebrada Amarilla	Jacó
Poblado	Paquita	Quepos	Poblado	San Isidro	Parrita
Poblado	Paquita	Quepos	Poblado	Turrubaritos	Jacó
Hacienda/ finca	Finca Anita	Quepos	Poblado	Playa Sur	Parrita
Poblado	Estero Damas	Quepos	Poblado	I Griega	Parrita
Poblado	Anita	Quepos	Poblado	Surubres	Parrita
Poblado	Ríos	Quepos	Hacienda/ finca	Finca Brazo Seco	San Juan grande
Poblado	Papaturro	Quepos	Sitio	Sitio Uvita	Ceiba
Poblado	Damas	Quepos	Poblado	Matamoros	Ceiba
Poblado	Damas	Quepos	Sitio	Sitio Tablas	Ceiba
Poblado	Cabitas	Quepos	Hacienda/ finca	Hacienda Mata de Guinea	San Juan grande
Poblado	Cerritos	Quepos	Hacienda/ finca	Finca Trinidad Nueva	Ceiba
Hacienda/ finca	Finca Cerros	Quepos	Poblado	Machuca	Ceiba
Poblado	Cerros	Quepos	Poblado	Jesús María	San Juan grande
Poblado	Cerros	Quepos	Sitio	Sitio Palmichal	Espíritu Santo
Poblado	Gallega	Quepos	Poblado	Gregg	Espíritu Santo
Hacienda/ finca	Finca Pirris	Quepos	Sitio	Sitio Junta	Barranca
Poblado	San Rafael	Quepos	Hacienda/ finca	Finca San Manuel	Pitahaya
Poblado	San Rafael	Quepos	Poblado	Barbudal	Miramar

Fuente: elaborado a partir de poblados del SNIT a escala 1:5 000 y modelo de interacción.

Conclusiones

La realización de esta investigación pone en evidencia los factores que se relacionan directamente con la determinación del hábitat potencial del cocodrilo, tales como: la altitud menor a los 700 msnm, la presencia de áreas de manglar, de ríos caudalosos y anchos, y playones, así como de áreas de inundación. Estos factores se convierten en variables que demarcan su localización espacial dentro de un territorio. Con respecto a las condiciones socio ambientales en el Pacífico Central, durante los últimos años, han transformado el mosaico paisajístico en las partes más planas a una matriz más dominante por las actividades agropecuarias. Lo anterior sumado al acrecentamiento de la población humana, ha inducido la ocupación de nuevos espacios para las actividades antrópicas y el establecimiento de infraestructura en áreas consideradas óptimas para el cocodrilo, lo cual ha incrementado la interacción entre ambas especies, tal como se reflejó en las Zonas de interacción entre el ser humano y el cocodrilo abordados en este estudio.

Lo anterior es un proceso que debe de considerarse fundamental en la definición de estrategias, acciones y propuestas que deben ser promovidas desde el ordenamiento territorial en el Pacífico Central, las cuales son insuficientes o carecen de una aplicación óptima que garantice la protección del hábitat potencial del *Crocodylus acutus*, por lo que es fundamental incrementar actividades de planificación y ordenamiento territorial a nivel local, en conjunto con las instituciones asociadas al tema y de esa manera garantizar el desarrollo de las actividades antrópicas en las zonas que se consideran no aptas para la presencia del cocodrilo, con el fin de reducir la interacción entre el ser humano y la especie.

Lo antepuesto tiene que estar relacionado con estrategias de educación y sensibilización, los resultados obtenidos reflejan la necesidad de establecer programas de educación ambiental en las comunidades cercanas al hábitat potencial o áreas de transición entre hábitats, con el fin de dar a conocer las condiciones biológicas de la especie, donde se considere su importancia a nivel eco-sistémica y factores que afectan su hábitat aumentando la interacción entre el ser humano y el cocodrilo. Así como delimitar las áreas de accesibilidad por parte de las actividades turísticas, ya que constituyen una interacción directa con la especie, donde se generan imprudencias como ofrecer alimento, generando en ocasiones interacciones negativas. Y finalmente, sería importante para futuras investigaciones complementar este tipo de trabajo de forma multidisciplinaria, donde se logre incorporar y desarrollar el componente biológico, en asociación con las características geográficas que conforman su entorno natural.

Bibliografía

Andrade, A. (2013). *Recomendaciones sobre la presencia del cocodrilo de río: Crocodylus acutus en cuerpos de agua del Campo de Golf "El Tigre" Nuevo Vallarta,*

- Nayarit*, Dirección estatal de Protección Civil y Bomberos División Fauna Silvestre, México.
- Ambrosio, G., González, J. y Arévalo, V. (s.f.). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga.
- Astorga, Y. (s.f.). “Situación del recurso hídrico”, *Décimo cuarto informe de la nación en desarrollo humano sostenible*, CONARE, Costa Rica.
- Bolaños, J., Sánchez, J. y Piedra, L. (1995). “Inventario y estructura poblacional de crocodílidos en tres zonas de Costa Rica. Laboratorio de Manglares, Área de Ecología y Manejo de Recursos Costeros”, *Rev. BioL Trop.*, 44(3)/45(1):283-287, 1996-1997, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Bolaños, J. (2012). “Manejo de cocodrilos (*Crocodylus acutus*) en estanques de cultivo de tilapia en Cañas, Guanacaste”, *Revista de Ciencias Ambientales* 43(1):63-72. EISSN: 2215-3896.
- (2011). *Propuesta plan de contingencia en el manejo de la población de cocodrilos del Gran Humedal del Tempisque (GHT)*, Asociación de Especialistas en Crocodílidos, Centroamérica, San José, Costa Rica.
- (2002). *Reflexiones acerca del conflicto entre el hombre (Homo sapiens) y el cocodrilo (Crocodylus acutus)*, Asociación de Especialistas en Crocodílidos, Centroamérica, San José, Costa Rica.
- Cortijo, M. (s.f.). *El cocodrilo de tumbres*, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú. Recuperado de <<http://hdl.handle.net/10757/345938>>.
- ESRI (2016). ArcGis (Spatial Analysis. Hydrology), EE.UU. Recuperado el 25 de abril del 2017 en la web: <<http://resources.arcgis.com/search/?do=search&start=0&lg=en&product=&version=&collection=&subject=&q=hydrology>>
- (2015). *Comprender el análisis de distancia euclidiana*, EE.UU. Recuperado el 20 de octubre del 2016 en la web: <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>>.
- Estado de la Nación. (2008). “La zona marino-costera”, *Decimocuarto informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible*, CONARE, Costa Rica.
- Fierro, J. (2010). *Análisis estadístico univariado, bivariado y variables control*, Universidad de Chile, Chile.
- IMN (s.f.). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*, San José, Costa Rica.
- García, J. y Buenrostro, A. (2015). *Áreas de interacción entre humanos y cocodrilos (Crocodylus acutus Cuvier) en Chacahua, Oaxaca, México* —Areas of Interaction Between Humans and Crocodiles (*Crocodylus acutus Cuvier*) in Chacahua, Oaxaca—, Editorial del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

- Magaña, F., Delgado, A., Núñez, C., Campos, E. y Pecero, L. (2010). *Ataques de cocodrilo de río (Crocodylus acutus) en Puerto Vallarta, Jalisco, México: presentación de cinco casos*, Universidad de Guadalajara, México.
- Morera, C. y Sandoval, L. (2015). *Evaluación de los procesos de conectividad/fragmentación en Costa Rica en el año 2000*, Escuela de Ciencias Geográficas, UNA, Heredia, Costa Rica.
- Ramírez, M., Jiménez, M. y Martínez, A. (2005). “Estructura y densidad de la red de caminos en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca”, *Investigaciones Geográficas, Boletín (57)*:68-80, Instituto de Geografía, UNAM.
- Sánchez, J. (2001). *Estado de la población de cocodrilos (Crocodylus acutus) en el río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica*. INBIO, Heredia, Costa Rica.
- Sandoval, L., Morera, C. y Sandoval, I. (2019). *Fragmentación del hábitat del Cocodrilo Americano (Crocodylus Acutus: Reptilia: Crocodylidae) por actividades humanas en el Pacífico Central, de Costa Rica*. Capítulo de libro. Paisaje y corredores en Costa Rica. Artículo en preparación.
- Sandoval, I. (comunicación personal, 3 de noviembre, 2016). Distribución del cocodrilo durante la época lluviosa, Heredia, Heredia, Costa Rica.
- Sandoval, I. y Bolaños, J. (2016). *Análisis del Hábitat del Cocodrilo —Crocodylus acutus— (Reptilia: Crocodylidae) en el Gran Humedal del Tempisque Guanacaste y la vertiente del Pacífico Central de Costa Rica*, Costa Rica, San José.
- SINAC (2014). Sistema Nacional de Áreas de Conservación, San José, Costa Rica.
- Submitted, T., Fulfillment, P., and Kong, H. (2010). *Application of Urban Climatic Map to Urban Planning of High Density Cities - A Case Study of Hong Kong, China*.
- Santillán, R. (2013). *Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de modelos zoogeográficos: un estudio de caso*, tesis de maestría en Geomática, con mención en ordenamiento territorial, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.

Os mapas como operadores na gênese da cidade espraiada. Desconstrução e semiose cartográfica na análise das plantas da cidade de São Paulo entre 1877 e 1930

Eliane Kuvásney*

Recebido 3 de julho de 2018; aceito 19 de dezembro de 2018

Abstract

The present work deals with the cartography produced about the city of São Paulo between 1877 and 1930 and how this cartography interfered in the way the city was seen and constructed in the period. We begin from the configuration of the metropolitan urban and its extension, so that the questions which guided the research revolved around the city's sprawling's logic. The city was designed for such structure or was it a product of the real estate market? Is this spreading due to socio-spatial inequalities or is it one of its causes? And, finally, if the maps interfered in the production of the sprawled city. Through a geo-historical approach and methodology of New History of Cartography map analysis, which constitutes in the deconstruction of cartographic objects through the understanding of the context in which they were elaborated, the thesis was developed. Therefore, the first part of the work is the contextualization of the period through existing bibliography, in addition to the analysis of the São Paulo City Hall's minutes and annals, and the main deputies' and mayors' reports, aiming the comprehension of the period and the way in which the municipal patrimony — as lands belonging to the municipality— was being appropriated by the real estate market in the city's construction, while obeying the code of posture that, since 1875, required that the municipality was mapped. With the objective of analyzing whether the maps would have performance capability in the geographic space, that is, if they acted as operators in the construction of the sprawled city, we also opted for unfolded analyzes of cartographic semiosis for a better understanding of the phenomena of

* Doutora em Geografia Humana pela Universidade de São Paulo, e-mail: ekuvás@gmail.com

self-reference and iconization. From the analysis of the three series of the city's maps it was possible, through the deconstruction and resignification of the map in its series, and the analysis of its self-referential aspects, to arrive at the genesis of the image of the city's sprawling —from the 1897 plant— and its unfolding.

Key words: *Geo-history, Cartography, São Paulo, space operators, self-reference, iconization.*

Resumo

O presente trabalho trata da cartografia produzida sobre a cidade de São Paulo entre 1877 e 1930 e de como essa cartografia interferiu na forma como a cidade foi vista e construída no período. Partimos da configuração do urbano metropolitano e de sua extensão, de forma que as questões que nortearam a pesquisa giravam em torno da lógica do espraiamento da cidade: se ela foi pensada para ter essa característica ou foi sendo construída ao sabor do mercado imobiliário, ou se o espraiamento é causa ou consequência das desigualdades sócio-espaciais e, por fim, se os mapas interferiram na produção da cidade espraiada. Através de abordagem geohistórica e da metodologia de análise de mapas da Nova História da Cartografia, que constitui na desconstrução dos objetos cartográficos por meio da compreensão do contexto em que foram elaborados, desenvolveu-se a tese. Por isso, a primeira parte do trabalho é a contextualização do período na bibliografia existente, além das análises das atas e anais da Câmara Municipal de São Paulo, e dos relatórios de intendentess e prefeitos, visando compreender o período e a forma como o patrimônio municipal —as terras pertencentes à municipalidade— foi sendo apropriado pelo mercado imobiliário na construção da cidade, ao mesmo tempo em que não se obedecia o código de posturas que, desde 1875 exigia que o município fosse mapeado. Com o objetivo de analisar se os mapas teriam capacidade de agir “com desempenho” no espaço geográfico, se os mesmos atuaram como operadores na construção da cidade espraiada, optou-se também por análises desdobradas da semiótica cartográfica com o propósito de compreender os fenômenos da autorreferência e da iconização. A partir da análise de três séries de mapas da cidade foi possível, através da desconstrução e da resignificação dos mapas em suas séries e da análise de seus aspectos autorreferenciais, chegar à gênese da imagem do espraiamento da cidade —a partir da planta de 1897— e seus desdobramentos.

Palavras-chave: *Geo-história, Cartografia, São Paulo, Operadores Espaciais, Autorreferência, Iconização.*

Resumen

El presente trabajo trata de la cartografía producida sobre la ciudad de São Paulo entre 1877 y 1930 y de cómo esa cartografía interfirió en la forma de como la ciudad fue vista y construida en el período. Se parte de la configuración del área urbano-

metropolitano y de su extensión, de forma que las cuestiones que guiaron la investigación giraban en torno a la lógica de la expansión de la ciudad: si fue pensada para tener esa característica o se fue construyendo según el mercado inmobiliario, o si la expansión fue causa o consecuencia de las desigualdades socio-espaciales, y finalmente, si los mapas interfieren en la extensión de la ciudad. A través del enfoque geohistórico y de la metodología de análisis de mapas de la Nueva Historia de la Cartografía, que constituye en la deconstrucción de los objetos cartográficos por medio de la comprensión del contexto en que fueron elaborados, se desarrolló el presente trabajo. La primera parte del trabajo, presenta la contextualización del período a partir de la bibliografía existente, además de los análisis de las actas y anales del Ayuntamiento de São Paulo, y de los informes de intendentes y alcaldes, con el fin de comprender el período y la forma en que el patrimonio municipal —las tierras pertenecientes al municipio— fueron apropiadas por el mercado inmobiliario en la construcción de la ciudad, al mismo tiempo que no se obedeció el código de situación que, desde 1875 exigía que el municipio fuera mapeado. Con el objetivo de analizar si los mapas tendrían capacidad de actuar “con desempeño” en el espacio geográfico, si los mismos actuaron como operadores en la construcción de la ciudad, se analizó la cartografía del período con el propósito de comprender los fenómenos de la autorreferencia y de la iconización. A partir del análisis de tres series de mapas de la ciudad fue posible, a través de la deconstrucción y de la resignificación de los mapas en sus series y del análisis de sus aspectos autorreferenciales, llegar a la génesis de la imagen de extensión de la ciudad —a partir de la planta de 1897— y su desarrollo.

Palabras clave: *Geo-historia, Cartografía, São Paulo, Operadores espaciales, Autorreferencia, iconización.*

Um olhar sobre a São Paulo do passado por meio da cartografia

Esta foi uma tese desenvolvida no âmbito da geografia, mas nossa análise situa-se no passado da metrópole paulistana (1870-1930) e, por isso, tratou-se de pesquisa desenvolvida a partir de um quadro geo-histórico, tendo como centro a organização espacial produzida.¹

A opção pela geo-história visava integrar a temporalidade ao objeto de pesquisa. No caso, o território do município de São Paulo, através de uma perspectiva diacrônica, analisando os fenômenos em sua evolução no tempo. Nessa abordagem, a escala

¹ O texto é um resumo estendido da tese defendida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana da FFLCH-USP, em 2017: *A representação da cidade de São Paulo nos albos do século XX. Os mapas como operadores na construção da cidade espraiada*. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-26042018-135249/pt-br.php/>>

espacial é também temporal, sendo necessário, portanto, analisar qual a extensão do fenômeno, de forma a refletir sobre sua duração. Descrever e interpretar a organização espacial de uma cidade tem, nos diversos recursos de representação, bons aliados metodológicos. Aqui irá se expor interpretações derivadas de um “saber visual” muito desenvolvido nas cidades, que é o mapa (Fonseca *et al.*, 2016).

Jaime Oliva e Fernanda Fonseca (2011), ao refletir sobre a questão da urbanidade em São Paulo, afirmam que não são comuns estudos sobre a metrópole que partam de elaborações teóricas sobre as cidades e que, em geral, “as cidades não são suficientemente conceituadas, pois costumam ser tratadas como cenários onde processos mais fundamentais se desenrolam”. Assim, estudos que levem em conta a

dimensão espacial (essa vista como uma das dimensões do social) é algo raro nos estudos urbanos da metrópole de São Paulo de um modo geral, e na Geografia também. Do mesmo modo, incluir a Cartografia e a representação das paisagens relativas às cidades como elementos que operam (e não apenas registram) sobre esses espaços, e em razão disso, utilizá-las como meios relevantes para interpretar as cidades também não é comum (Oliva e Fonseca, 2011, p.14).

Tendo em conta a questão levantada pelos autores sobre a ausência de trabalhos que investigassem como a cartografia operou na configuração espacial da metrópole, nossas análises, adotando a abordagem geo-histórica, seguiram a metodologia da Nova História da Cartografia, ou seja, a desconstrução dos mapas, por meio da metodologia proposta por J. Brian Harley (1987, 2005). Mas, ao observar-se que os mapas também são instrumentos miméticos que vão além de seus fins pretendidos e se elevam acima das questões culturais que originalmente os moldaram, optou-se também por análises desdobradas da semiótica cartográfica (desenvolvida por Emanuela Casti, 1998, 2005) para uma melhor compreensão dos fenômenos da autorreferência² e da iconização.³ Assim, os mapas foram analisados enquanto sujeitos das ações de transformação do território.

Jean-Marc Besse, numa reflexão acerca da cartografia e do pensamento visual, nos lembra da importância do mapa, ao afirmar que:

o mapa é objeto e ato de poder ao mesmo tempo. Por um lado, o mapa leva a marca de uma intenção, de um interesse de origem econômica, política, ideológica, até mesmo científica, que vai orientar a seleção das informações, seguida da sua apresentação cartográfica. Mas, por outro lado, o mapa tem o poder, como muitas outras imagens, de orientar as decisões da sociedade e da cultura, simplesmente porque formata a visão do mundo sobre a qual se baseiam essas decisões (Besse, 2006, p. 5, trad. nossa).

² Autorreferência, segundo Casti (2005) é a capacidade de um mapa ser aceito como tal e, ao mesmo tempo, desempenhar um papel na comunicação que é independente das intenções do cartógrafo que o produziu.

³ A iconização, segundo a mesma autora, trata-se da capacidade do mapa de estabelecer como o território deve ser concebido e experimentado.

Nesta concepção, fundada na Nova História da Cartografia (NHC), o mapa é visto como um objeto de saber-poder (J. B. Harley, baseado em Michel Foucault), mas também é visto como sujeito, que formata visões, e é capaz de operar transformações. Assim, tendo essa última afirmação como hipótese, mobilizaram-se mapas históricos com o objetivo de investigar se tais imagens tiveram o poder de moldar —mesmo que indiretamente— a realidade do território, ou ainda se elas teriam promovido o que percebemos hoje como uma naturalização do espraiamento da cidade. Nesse sentido, e pensando no que existe sobre a cidade de São Paulo nos albores do século XX, o que se narra convincentemente é internalizado e, consciente ou inconscientemente, informa algumas ações, projetos, planos e políticas. Assim, é importante rever as imagens que partilhamos sobre o período que a historiografia denominou de República Velha porque elas nos mostram permanências de representações que hoje criticamos.

Os mapas como operadores em diferentes mises en intrigue do espaço

Os operadores espaciais são, conforme definido por Michel Lussault (2007, p. 19), “entidades que possuem uma capacidade de agir com ‘desempenho’ no espaço geográfico das sociedades interessadas”. Existem diferentes tipos de operadores humanos (os indivíduos ou o coletivo) e não humanos. Esse mesmo autor (*idem*, p. 150) afirma que os operadores não humanos são designados e construídos como tais pelos humanos e estes últimos definem sempre os limites que os separam do que lhes é externo, ao mesmo tempo em que elaboram todos os métodos de apreensão —pelos demais humanos— dos não humanos, de forma que há, evidentemente, sempre uma parte de humanidade nos operadores não humanos. Estes, a partir das ações nas quais se inscrevem, às vezes são dotados pelos operadores humanos de uma espécie de caráter e, quase personificados, tornam-se então o que foi denominado de “quase personagens”. Nessa investigação partimos da hipótese que determinados mapas se tornam mais que “simples protagonistas”, ou seja, tornam-se “quase personagens”, apesar de serem objetos, artefatos. E é aí que entra a semiótica cartográfica desenvolvida por Emanuela Casti (1998, 2005). Através da autorreferência e da iconização estes artefatos deixam de ser simples protagonistas para —dotados de competências enunciativas que os hibridizam— tornarem-se “quase personagens”, pois passam a interferir nos arranjos espaciais existentes, desempenhando um papel na comunicação que é independente das intenções do operador que os produziu.

Mapas operando transformações. Essa foi a hipótese do trabalho. Dois autores, Jean-Marc Besse (2014) e Michel Lussault (1995) têm nas teorias de Paul Ricoeur (1913-2005) a base para a explicação do mapa como objeto capaz de operar transformações (o mapa como sujeito da ação). Besse lembra que os atlas nos apresentam

uma *mise en intrigue*⁴ do espaço, cujo papel é a configuração do espaço geográfico semelhante ao do calendário, da sucessão das gerações e da acumulação dos vestígios documentais —os mapas— para a configuração do tempo histórico. Ele afirma que:

o atlas faz parte dos dispositivos de articulação do espaço em mundo. No atlas, pelas operações de divisão das unidades espaciais e a reunião dos mapas numa sequência ordenada, o espaço geográfico é, por assim dizer, formado e tornado habitável. (Besse, 2014, p. 14, trad. nossa).

Esse autor vê o atlas como um dispositivo⁵ e, por isso, capaz de operar transformações, na medida em que “se apresenta ao leitor como uma configuração objetiva na qual pode se orientar e dar uma significação concreta, neste caso especial, às suas condutas” (*idem.*, *ibidem*).

Os atlas são grandes narrativas e essas narrativas são estruturadas por meio de mapas. Neles, o espaço geográfico ordena-se e desenvolve-se de acordo com uma hierarquização de escalas relativamente clara em um esquema intelectual geral que há muito tempo se impõe nos atlas geográficos modernos: começam pelo mapamúndi, com uma visão geral do globo, depois abordam alternadamente as partes do mundo (por exemplo: Europa, Ásia, América, África), que são divididos em países e esses países divididos em regiões... Uma narrativa do espaço desde Ortelius e seu *Theatrum orbis terrarum*.

Já Michel Lussault (1995) nos explica que os projetos urbanísticos, dependentes dos mapas para se concretizarem também constituem em narrativas e que, neles,

a *mise en intrigue* se escreve menos do que se representa visualmente, pois a narrativa é, acima de tudo, suportada pela iconografia [as plantas, as maquetes etc], que fixa e restringe a palavra, descritiva, explicativa, interpretativa” (Lussault, 1995, p. 171, trad. nossa).

Lussault também lembra que a *mise en intrigue* faz parte de um todo, por Ricoeur denominado de *triplo mimesis*, que ele transpõe para o processo de elaboração do projeto urbanístico:

Em redor da fase essencial de configuração dinâmica da trama [a *mise en intrigue*] encontramos primeiro, a montante, uma pré-compreensão do mundo da ação, que é aquela, aqui, da operação proposta/projetada - configuração da trama, ou seja, elaborada a partir do ordenamento proposto - intersecção do mundo do projeto e daqueles dos patrocinadores, usuários, etc (...). É claro que a mediação social, o terceiro nível, se manifesta pouco ou

⁴ A ‘*mise en intrigue*’, para Paul Ricoeur, “consiste em combinar os acontecimentos contados, os episódios, numa totalidade configuracional e a vincular uma história a um narrador” (Louis Panier. *Ricoeur et la Semiotique*. Disponível em: http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/35/36/43/DOC/Panier_Ricoeur_semotique.doc Acesso em 28/02/2014.

⁵ Conforme Giorgio Agamben: “Chamo dispositivo tudo o que tem, de uma maneira ou outra, a capacidade de capturar, orientar, determinar, interceptar, modelar, controlar e assegurar os gestos, as condutas, as opiniões e os discursos dos seres vivos” (*Qu'est-ce qu'un dispositif?* Rivages, 2007, p. 31, citado por Besse, 2014, p. 9).

nada durante todo o desenrolar e, além disso, frequentemente influencia os dois outros. Por exemplo, a intervenção do campo político - uma das formas obrigatórias da mediação, porque não podemos esquecer que este não é um jogo de soma zero, que os desafios e as relações de poder são reais, mesmo se a encenação da transação os eufemise... (Lussault, 1995, p. 172, trad. nossa).

Para esses dois autores, a *mise en intrigue* do atlas ou do projeto urbanístico é orientada pelos mapas, os objetos técnicos⁶ dotados pelos que os inserem em suas respectivas narrativas —os operadores humanos, sejam eles o cartógrafo, o editor ou o colecionador, no primeiro caso, ou os urbanistas, no segundo— de uma capacidade, de uma essência que os transforma —os objetos— em protagonistas daquelas ações. Mas, e quanto à produção da cidade da São Paulo? É interessante retomar o exemplo do fotógrafo Militão Augusto de Azevedo que, ao produzir o *álbum comparativo da cidade de São Paulo* (1862-1887), com suas vistas urbanas,

foi um dos primeiros produtores, senão o primeiro, que se empenham na formação de uma imagem moderna para São Paulo, através do meio utilizado para a produção dessas vistas —a fotografia— e, em especial, por buscar apresentar, por meio da montagem de uma sequência de imagens, o próprio processo de modernização da capital provincial (por ele nomeado em suas cartas através do termo ‘progresso’) (Araujo, 2006, p. 117).

Militão evidentemente produziu uma narrativa da cidade em processo de transformação (sua pré-compreensão do mundo da ação, conforme Ricoeur), pois tinha claramente como objetivo mostrar o “processo de modernização” dessa cidade.

No caso da pesquisa em tela, também se construiu uma *mise en intrigue* —uma narrativa— cujo enfoque foi a produção da cidade entre o fim do Império e o fim da República Velha (1877-1930), onde pudemos denotar o protagonismo dos mapas, mas no sentido de uma desconstrução da ideia de cidade moderna que o grupo no poder (os velhos comerciantes, os cafeicultores e a emergente burguesia industrial) queria construir. Ao se estabelecer séries de mapas —os produzidos por Jules Martin no fim do Império; os produzidos pela e para a administração municipal entre 1897 e 1930 e os produzidos pela Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (CGGSP) para as exposições— foi possível observar, por meio da contextualização de sua produção, de sua desconstrução e da análise semiótica, que uma parte daqueles mapas foi, de fato, protagonista na organização espacial da cidade de São Paulo. Seu papel na construção da narrativa da modernidade paulistana, ao mesmo tempo que foi esclarecido, foi também desconstruído, de forma a podermos compreender melhor a ação dos demais operadores espaciais. Determinados mapas, no entanto, ao serem

⁶ *Objeto técnico* no sentido empregado por Milton Santos: “As técnicas, de um lado, nos dão a possibilidade de empiricização do tempo e, de outro lado, a possibilidade de uma qualificação precisa da materialidade sobre a qual as sociedades humanas trabalham. Então, essa empiricização pode ser a base de uma sistematização, solidária com as características de cada época” (Santos, 2002, p. 54).

usados para comunicar conjecturas como verdades, passaram a oferecer uma conceitualização do território, deslocaram o processo de comunicação do mapa da descrição para a conceitualização e tornaram-se “quase personagens”.

A semiose cartográfica

A semiose cartográfica desenvolvida por Emanuela Casti (1998, 2005) estabelece que um estudo semiótico dos mapas não pode ser separado de um estudo semiótico do território. Ela parte do pressuposto de que o significado social do território se encontra na sua configuração semiótica, o território constitui-se linguisticamente como um conjunto de designadores que têm um valor cognitivo e ao mesmo tempo comunicativo (Turco, 2006). Essa abordagem sustenta que os mapas se baseiam numa *meta-semiose* (ou semiose de segundo nível), uma vez que sua linguagem é moldada na linguagem territorial (ou semiose de primeiro nível). Nesse sentido, a autora afirma que

dois aspectos da interpretação cartográfica devem ser observados: (1) que o nome dado no mapa é visto não como um signo entre muitos outros, mas como aquele pelo qual toda a informação cartográfica é organizada; e (2) que a semiose —o processo pelo qual a informação é produzida e transmitida— ocorre na presença de um intérprete, que tem uma dupla função como agente territorial e como alguém que se comunica dentro de uma dada sociedade. (Casti, 2005, p. 5, trad. nossa)

A semiose cartográfica está apoiada na abordagem hermenêutica e trabalha com a ideia do mapa como instrumento de intervenção entre a sociedade e o território, partindo da premissa de que os mapas, nesse tipo de relação, desempenham papel crucial. Essa autora afirma que:

a hermenêutica foca no papel dos mapas como agentes capazes de implantar informações autorreferenciais para moldar efetivamente a intervenção humana no território, ou seja, os mapas lidam com um espaço geográfico complexo, reformulando-o como um espaço cartográfico com base na ação que é executada” (Casti, 2005, p. 5, trad. nossa).

Para compreendermos melhor a semiose cartográfica (Figura1), Casti (2005) lembra que essa abordagem vê o território não exclusivamente como um dado empírico, mas como um processo pelo qual uma sociedade transforma o espaço natural e o impregna de sentido e significado. Assim, o processo de territorialização —por ela entendido como “multiplicidade de procedimentos em ação sobre o território”—pode ser dividido esquematicamente em três grandes categorias:

1. Denominação: envolve o controle de símbolos, ou seja, as operações voltadas para a modelagem intelectual e apropriação do território: a atribuição de nomes a pontos na superfície da terra, que são assim identificados como lugares.

2. Reificação: o exercício do controle material, isto é, a construção física e apropriação do território.
3. Estruturação: a criação de contextos operacionais para a execução de projetos sociais.

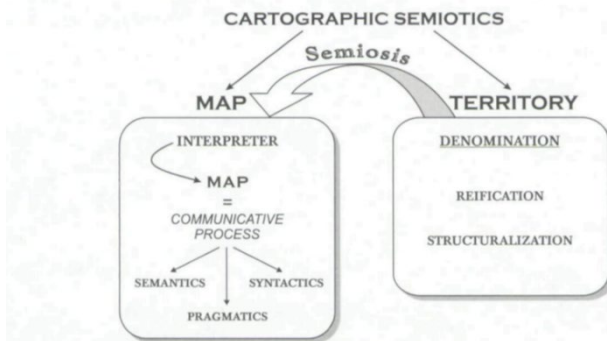


Figura 1. A transferência da semiose territorial e o estabelecimento da meta-semiose cartográfica. Fonte: Casti, E. “Towards a Theory of Interpretation: Cartographic Semiosis”, *Cartographica*, vol. 40, n.º. 3, 2005, p. 7).

A importância da denominação: os designadores

Casti afirma que a *denominação* é um processo complexo em que diferentes significados entram em jogo, dependendo do tipo de designador usado e sobre os tipos de valores que pode transmitir. “Quando usamos este termo, estamos nos referindo à atribuição de nomes que refletem os valores da sociedade que os executa” (Casti, op.cit, p. 5). Ela os classifica como “aglomerados de conceitos” que localizam/identificam, no território, os valores culturais sobre os quais o funcionamento da sua sociedade se baseia. Por isso ela os classifica de “designadores” e não de topônimos.

A análise denominacional foi emprestada da semiologia da territorialidade desenvolvida por Angelo Turco, nos anos noventa.⁷ Segundo esse autor,

a denominação aparece como um conjunto de procedimentos que asseguram o controle intelectual do território. (...) O mais elementar dos saberes territoriais é o referencial. Ele está incluído nos designadores que fixam uma referência sobre a superfície terrestre: indicando com precisão a posição de um lugar, em absoluto ou em relação a outros lugares, esses designadores possibilitam o posicionamento dos sujeitos, dos objetos e dos eventos, consentindo assim às pessoas que se desloquem no espaço sem correr o risco de perder-se. (...) [Quanto ao saber] do tipo simbólico (...) os designadores não se limitam a fixar no terreno uma referência, mas transferem para a superfície terrestre crenças generalizadas,

⁷ Ver, entre outros: Turco, A. (1988). *Verso una teoria geografica della complessitud*. Milano: Unicopli e Turco, A. (1994). *Semiotica del territorio: congetture, esplorazioni, progetti*. *Rivista Geografica Italiana*, [S.l.], n.º. 101, pp. 365-383.

baseadas em valores socialmente produzidos e difusamente compartilhados. (...) Uma ulterior forma de saber territorial é a performativa (...) os designadores são avaliados e julgados tendo por base um critério de verdade (...) e encarregam-se de colher, do modo mais preciso e aprofundado possível, os traços do ambiente no qual vivem os diversos povos, de maneira compatível com cada uma de suas tradições, com cada um dos respectivos projetos sociais (Turco, 2006, pp. 6-8).

Sendo os designadores descrições abreviadas da realidade, “aglomerados de conceitos”, Casti afirma que a significação cartográfica deve ser pensada levando-se em conta a clássica distinção semiótica entre codificação denotativa ou primária e codificação conotativa ou secundária.⁸ Assim, o primeiro nível de leitura é o do designador *referencial*, que é explicitamente codificado para criar um quadro referencial, “um sentido evidente e superficial” (exemplos da autora: do Grand Canyon, Colorado, ou da Quinta Avenida, em Nova York). O segundo nível de leitura torna-se necessário para designadores *simbólicos* e *performativos*, “porque aqui devemos reconhecer a sedimentação de valores culturais, técnicos e ‘históricos’ [São Francisco, Hot Springs Mountain, Nova York, respectivamente], gerados por uma sociedade que só pode ser entendida através de um nível mais profundo de investigação”.

Sintetizando o peso da denominação na semiose cartográfica, Casti, ao discorrer sobre a importância da análise dos designadores simbólicos e performativos que mudam dependendo do contexto social ou político, argumenta que o mapa não é apenas o lugar dentro do qual se realiza a apropriação intelectual do território. É também uma projeção denominativa porque transmite o(s) significado(s) guardado(s) no designador por meio de outros códigos, chamados *substitutos denominativos*. É função comunicativa que desempenham e porque assumem alguns dos valores/significados a serem transmitidos e os comunicam como significantes. Um substituto denominativo pode ser qualquer figura, número, cor ou mesmo a posição do nome no mapa, destinada a tornar explícita a qualidade do objeto representado no mapa. (Casti, 1998, p. 65 e Casti, 2005, p. 6).

Dessa forma, o mapa carrega um complexo sistema de informações envolvendo diferentes códigos, o que faz dele um hipertexto, uma linguagem multi-estrutural e, “como tal, desempenha um papel naquilo que ele comunica de uma forma autorreferencial”, pois o uso de várias estruturas facilita o transporte de informações e a inter-relação entre diferentes códigos traz o que pode permanecer obscurecido em um código individual. (*idem*, p. 6). Uma constatação de Casti (2005) sobre esse processo é que o designador, ao impor uma hierarquia entre os substitutos (figura, número, cor, posição), é o cerne do processo pelo qual a informação é realmente produzida.

⁸ Codificação denotativa = sentido literal. Codificação conotativa = sentido figurado.

Ícone cartográfico x autorreferência

Ícone, para Casti, é uma figura semiótica que é capaz de produzir informação e processá-la num sentido comunicativo - diferente de outras conceituações semióticas, como para Charles S. Peirce (2005), nas quais o ícone é um signo habilitado a representar seu objeto meramente em função de suas qualidades. Segundo Casti (2005), o ícone cartográfico toma o referente do designador, o modela de alguma forma e depois o introduz na troca de comunicação via mecanismos auto-produtivos; o ícone toma o designador e o envolve com determinado conteúdo, estabelecendo assim o modo como ele pode servir na *práxis* territorial. Assim, uma vez colocado sobre a folha, o ícone age de duas maneiras sobre o designador: primeiro, oferece uma representação figurativa de sua localização-e assim fortalece sua referencialidade (denota); segundo, realça certos aspectos, cuja importância é determinada por um contexto social particular (conota).

O uso de procedimentos figurativos [denotativos e conotativos] na criação de tais ícones não só desenvolve a informação comunicada pelos designadores, mas também a intensifica. Tais procedimentos são: a organização espacial, na qual a topografia serve para reforçar a natureza referencial do mapa, trabalhando assim a um nível denotativo; a figuração propriamente dita, na qual os códigos visuais são utilizados para realçar as características distintivas do referente; e a iconização, que combina os resultados da organização espacial e da figuração e impregna o designador com implicações sociais ou valores. O resultado é que este último se torna simbólico e/ou performativo (Casti, 1998, p. 70).

O excerto acima esclarece duas coisas: 1) que os ícones não mostram a realidade como ela é. “Em vez disso, **eles mostram como ela aparece dentro de uma teoria particular do mundo**” (Casti, 2005, p. 10), por meio da visão particular de quem o produz; e 2) é pela ação dos ícones que o que é representado torna-se conceituado e é comunicado por um processo dinâmico o qual oferece uma visão particular do mundo-a visão do cartógrafo. Assim, o sistema icônico baseia-se na capacidade do mapa de **transmitir os valores culturais atribuídos ou investidos** em um território específico.

Diferentemente do ícone cartográfico, o termo *autorreferencia* indica a capacidade de um mapa ser aceito como tal e, ao mesmo tempo, desempenhar um papel na comunicação que é **independente das intenções do cartógrafo que o produziu** (Casti, 1998 e 2005, trad. nossa).

Esta autorreferencia é o resultado do tipo de sistema comunicativo usado e da ação do ícone na denominação em desenvolvimento. Nomes, formas e cores —em suma, toda a linguagem do mapa— desempenham um papel nesse mecanismo “autogerador”. (Casti, 2005, p. 10).

Então, o que faz com que o conjunto de ícones cartográficos contidos no mapa, que são produto da visão particular de quem o produziu, se torne autorreferente, desempenhe um papel na comunicação que é independente das intenções de quem o produziu? Como o mapa se torna capaz de condicionar a informação sobre o que retrata?

O mapa torna-se autorreferencial porque se mostra capaz de condicionar a informação sobre as coisas que retrata. Isso significa que, uma vez criado, **o mapa é um sistema de signos dotado de vida própria**; ela se desenvolve independentemente do que o precedeu e das intenções por trás de sua criação original (*idem, ibidem*, grifos meus).

Além desse aspecto chamado de “interno” pela autora, ela chama a atenção para o fato de a interpretação do mapa estar “ligada à sedimentação de documentos cartográficos ao longo do tempo e à experiência acumulada das pessoas chamadas a lê-los”, ou seja, **esses dois fatores —sedimentação e experiência— pré-definem o que é um mapa e influenciam o modo como ele é percebido, construindo uma memória de mapas dentro da sociedade**. Essa memória, por sua vez, significa que estes intérpretes do mapa

trabalham dentro de uma codificação que já aconteceu, e a sedimentação ao longo do tempo consolidou as várias atribuições de sentido e significado. Da mesma forma, a conexão entre os signos obedece às regras de percepção visual. **A informação transmitida não é a soma do que é transmitido por cada ícone, mas o resultado da interação entre essas informações**. Em suma, a interpretação de um mapa baseia-se no reconhecimento das formas pelas quais um mapa se define como tal (*idem, ibidem*, grifos meus).

O paradoxo da autorreferência é o fato de que os mapas, como modelo, não podem duplicar a realidade, mas podem substituí-la. Casti (2005, p. 10) afirma que “o mapa não se oferece como território; ele realmente apresenta-se como existindo em um nível mais elevado do que a realidade bruta” e, a partir do momento em que os mapas passam a transformar conjecturas em verdades, eles se tornam objetos icônicos.

O território mimetizado. O processo de iconização do mapa.

A pergunta que se faz aqui é: a mensagem comunicada pelo mapa pode substituir a verdade? De acordo com Casti (2005), isso ocorre porque no processo de *iconização*, o significado gerado por um mapa é introduzido em um circuito de comunicação explorando as principais funções do próprio mapa: a *descrição* – as características do território que poderiam ser percebidas pela via da observação direta do mundo real —e a *conceitualização*— aplicando as categorias de representação (que incorporam uma interpretação) para dizer “como o mundo funciona”. Dessa forma, o mapa provoca uma mudança na comunicação do nível da descrição para o nível da enunciação: ele se transforma em *discurso*.

O resultado é que a confiabilidade atribuída à descrição também é atribuída ao conceito... a iconização promove o uso do mapa como uma teoria em que se pode confiar para avaliar toda a informação envolvida pela ativação de um sistema no qual vários fragmentos de informação e conceitos são feitos para circular infinitamente e em diferentes formas sobre o plano duplo de comunicação cartográfica: descrever e conceitualizar (Casti, 2005, p. 11).

Casti (2005) nos lembra, sobre esse processo, que o fato do mapa ser um mecanismo de representação capaz de *mimesis* significa que ele tem maior capacidade comunicativa do que o próprio território bruto e, portanto, acaba assumindo o lugar desse território.

A eficácia do mapa como dispositivo mimético vem de sua equação implícita: mapa = território. Esse poder de *mimesis*, como ressaltado pela análise semiótica da cartografia, é o que permite a um mapa comprometer e alterar o significado de território. (Casti, 2005, p.12)

Desconstrução ou semiose cartográfica?

O que vemos por meio da meta-semiose é um passo avante nas análises desconstrutivistas propostas por J. B. Harley. O foco principal das análises de Harley, de que os mapas são “imagens carregadas de intenções e consequências que podem ser estudadas nas sociedades de seu tempo”, de que mapas são instrumentos de saber-poder, se tornou restritivo na medida em que se observa que os mesmos são “instrumentos miméticos que vão além de seus fins pretendidos e se elevam acima das questões culturais que originalmente os moldaram”. **Os conceitos de autorreferencia e iconização enriquecem as análises desconstrutivistas, pois trazem nova perspectiva à essas análises.**

Em termos metodológicos, prevalece a necessidade de desconstrução do mapa, mas é preciso também decodificá-lo “para encetar uma recodificação que possa revelar seu impacto elaborado na produção e na circulação do significado territorial” (Casti, 2005, p. 7).

Os mapas como protagonistas da modernidade paulistana

Três séries de mapas da cidade de São Paulo foram analisadas, elaboradas no período de 1870 a 1930 – final do Império e República Velha. Aqui será tratada somente a série de plantas consideradas “oficiais”, a segunda série analisada. Segue o endereço das plantas em seus respectivos repositórios digitais para uma melhor visualização:

- I. Planta Geral da Capital de São Paulo organizada sob a direção do Dr. Gomes Cardin Intendente de Obras. 1897. Escala 1:20.000. BNDigital. Disponível em: <http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart71701/cart71701.jpg>.

- II. Planta Geral da Cidade de São Paulo 1905 adotada pela Prefeitura Municipal para uso de suas repartições. Levantada e organizada pelo Engenheiro Civil Alexandre Mariano Cococi e Luiz Fructuoso F. Costa Engenheiros da Comissão Geográfica e Geológica. BNDigital. Disponível em: <http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart523225/cart523225.jpg>.
- III. Planta Geral da Cidade de São Paulo de 1913. Levantada e organizada pelo Engenheiro Civil Alexandre Mariano Cococi e Luiz Fructuoso F. Costa. Propr. Exclusiva da Cia. Lith. Hartmann-Reichenbach. Escala: 1:20.000. BNDigital. Disponível em: <http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart520031/cart520031.jpg>.
- IV. Planta da Cidade de São Paulo levantada pela Divisão Cadastral da 2ª Secção da Directoria de Obras e Viação da Prefeitura Municipal – Edição Provisória aprovada pelo Acto n. 972 de 24 de agosto de 1916. APESP. Disponível em: <http://www.arquivoestado.sp.gov.br/site/acervo/repositorio_digital/mapa_carto/BR_APEsp_IGC_IGG_CAR_I_S_0202_001_001>.

A série inicia com a planta que é o foco principal das análises sobre a cartografia que se desdobra a partir dela: a planta geral de 1897 (Figura 2) que foi elaborada entre 1896 e 1897 como um projeto da cidade, contendo loteamentos inexistentes naquele momento (dos quais a maioria foi sendo implantada ao longo das décadas seguintes), mas apresentada e comercializada como a planta da cidade daquele ano. O fato dela ter sido elaborada na escala 1:20.000 e, portanto, ser a primeira a apresentar o rio Tietê em proporções monumentais, além de mostrar a cidade muito além da colina histórica, ainda no século XIX, nos faz refletir sobre sua influência na forma de ver e pensar a cidade desde então. Em primeiro lugar, ela foi comercializada como planta da cidade por meio de anúncios de jornal e utilizada como prova da existência de rua por cidadão comum perante a justiça e, com isso, declarada planta oficial da cidade já em 1913, após a publicação da planta de 1905. Em segundo lugar, as plantas de 1905 e 1913 vão mostrando a implantação dos loteamentos/arruamentos que ali foram colocados, mas de maneira gradual, indicando que os mesmos, a partir de sua aparição em 1897, foram automaticamente autorizados pela Câmara – pois não se localizam discussões sobre eles nas atas e anais da Câmara, indicando a autorreferencialidade daquela planta.

Além disso, pela análise denominacional observou-se que quem elaborou aquela planta “marcou” os loteamentos inexistentes por meio de três formas de nomeação das ruas: nomes em tupi-guarani, nomes de serras e uma terceira, menos perceptível: nomes de pessoas próximas ao grupo que estava organizando a planta (Figura 3). Essas marcas foram desaparecendo conforme os loteamentos iam se estabelecendo e as ruas iam sendo nomeadas através de leis ou atos do prefeito. Mas, alguns daqueles nomes provisórios permaneceram e essas permanências podem ser lidas como autorreferenciais, pois os nomes **permaneceram porque estavam no mapa**.

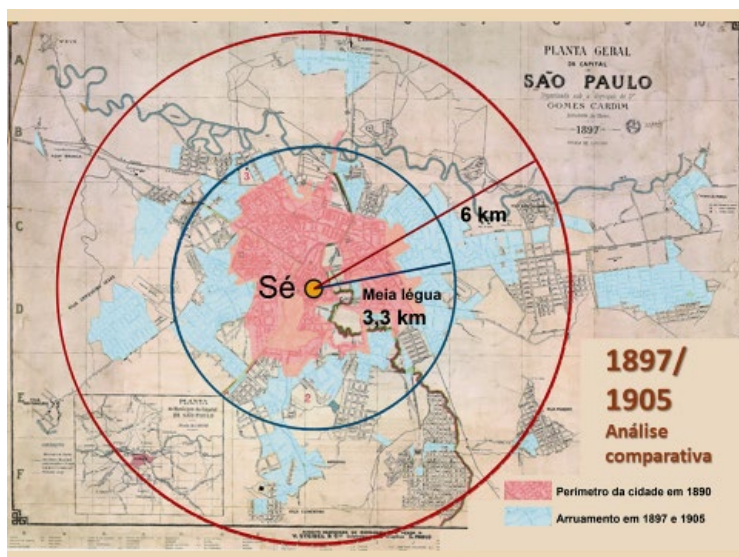


Figura 2. Sobre a planta de 1897 (que era um plano), estão o perímetro da cidade em 1890 (em rosa) e os loteamentos existentes na planta de 1905 (em azul). Os círculos indicam as terras do patrimônio municipal (meia légua do rossio —até o final do Império— em azul e 6 Km —na República— em vermelho).

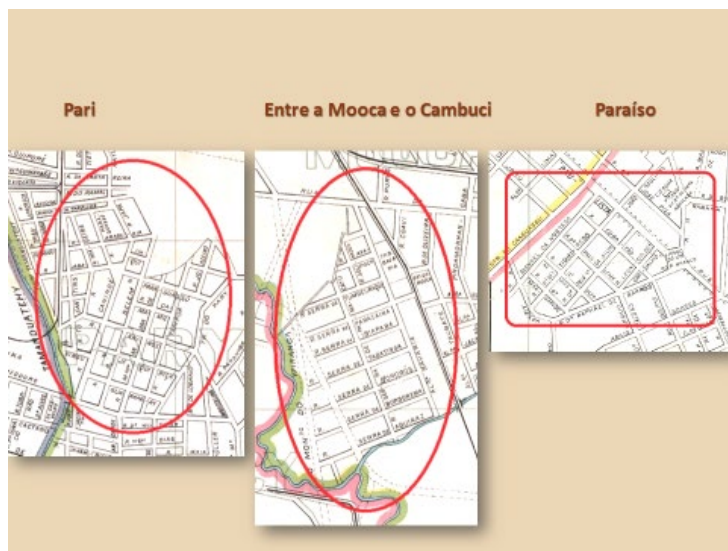


Figura 3. Três loteamentos existentes na planta de 1897 que apresentam ruas com nomes em tupi-guarani (Pari), serras (loteamento entre a Mooca e o Cambuci) e nomes de pessoas próximas ao grupo que elaborava a planta (Paraíso).

Observou-se também que a planta de 1916 (Figura 4), a única organizada dentro da Diretoria de Obras e Viação (DOV) após a elaboração da planta de 1897, retoma a forma inicial dos loteamentos/arruamentos que observamos estar sendo implementados gradualmente nas plantas de 1905 e 1913, ao mesmo tempo em que inclui um novo substituto denominativo para figurar os terrenos apropriados mas não construídos, as “cercas” (Figura 5), o que acaba nos mostrando duas coisas: a primeira é que a forma, a morfologia da cidade (especificamente do subúrbio) apresentada em 1897 permanecia, ao menos no que se configurava como terrenos apropriados, a espera de valorização. A segunda é que o que dá substância à imagem da cidade espalhada é a cerca e não sua efetiva ocupação, que é mostrada, desde 1905, por meio da mancha que indica a existência de edificações e ela nos mostra que a cidade efetivamente existe no centro e nas bordas daquela forma que se estabelece em 1897.



Figura 4. Sobre a planta de 1916 estão os círculos que indicam o antigo rossió (azul) e o patrimônio municipal, de 6 km (em vermelho). Esta planta apresenta os perímetros central, urbano, suburbano e rural estabelecidos em 1915.

É importante salientar que, como imagens produzidas em contextos diversos, as plantas apresentam marcas relativas a esses contextos. A planta inicial da série de 1897 (Figura 2) traz a marca do que se queria determinar: a área do patrimônio. Ela foi estabelecida em escala 1:20.000 de forma que a totalidade do patrimônio municí-

pal —representado como um retângulo, conforme demarcado no mapa a ela encar-
tado— nela estivesse representado. E essa forma se estabelece para as plantas seguin-
tes, até a década de 1930, quando a preocupação parece não ser mais apropriar-se dos
terrenos do patrimônio, mas tentar reaver parte deles. A planta de 1916, também pro-
duzida dentro da DOV é a planta de 1897 melhorada, pois retomam-na incluindo os
loteamentos/arruamentos novos, assim como a legislação que demarca os perímetros,
além de incluir as cercas, deixando claro para os produtores do mapa e da cidade (o
mesmo grupo político no poder) a imagem da cidade que estavam produzindo.



Figura 5. A legenda da planta de 1916 indicando as ruas com e sem construções e as “cercas”, e um excerto da planta, mostrando as cercas existentes além do limite leste do perímetro suburbano (em verde), indicando a apropriação das terras do subúrbio como reservas de valor.

Sobre a apropriação do patrimônio público nesse processo, observou-se que a planta de 1897 mostrava o esforço de apropriação privada das terras públicas contidas no raio de 6 km, terras que, na origem foram doadas e estabelecidas como tal, mas que a Câmara, ao longo dos séculos XVIII e XIX tratou como terras a serem apropriadas pelos que dividiam o poder local com os vereadores. Assim, um mercado de terras instalou-se nessa área, bem antes da elaboração de tal planta, mas visível na demarcação dos perímetros de 1915 (na planta de 1916, Figura 4), quando vemos o círculo do antigo rossio (meia légua) totalmente preenchido pela mancha com edificações e, consequentemente, demarcado como perímetro urbano, área que seria submetida a

partir de então a um maior controle no que se refere a abertura de ruas e construções – e de preços altíssimos dos lotes restantes ou das edificações.

O restante do patrimônio municipal – a área que ia do perímetro urbano até o limite dos 6 km de raio, demarcada como zona suburbana, foi taxada como área de controle intermediário, garantindo não só a legalidade da quase totalidade dos loteamentos/arruamentos estabelecidos na planta de 1897, mas também estabelecendo regras à abertura de novas ruas, o que garantia maior dificuldade no acesso à terra, com terrenos mais caros, liberando o restante do território municipal — a zona rural — para o mercado imobiliário atuar com mais liberdade, por meio da legislação mais frouxa e, portanto, com terrenos destinados às classes de renda mais baixa, já que não teriam equipamentos urbanos disponíveis. Essa gradação do controle e da fiscalização por perímetros também estava estabelecida para a ação da prefeitura com relação aos melhoramentos: quanto mais distante do centro, menor seria a atuação das diretorias sobre o território, garantindo a tabela de valores diferenciais do mercado imobiliário. Uma prática consagrada desde então.

Além de todos os aspectos autorreferenciais observados na planta de 1897, resu- midos na ideia de que conjecturas foram comunicadas como verdades, ou seja, ao ser comercializada como planta da cidade e divulgada como tal inclusive pelo poder público, **sua função descritiva** —de apresentar as características do território— **foi utilizada para apresentar uma conceitualização da cidade “espalhada”**, o que funcionou no sentido da iconização dessa planta, pois a transformaram na “verdade do território”.

A figuração, ou a forma da cidade espalhada deslocou a comunicação do nível da descrição para o da conceitualização. Ela apresentou um novo conceito de cidade, diferente daquele observado nas plantas até então feitas: o conceito de “cidade espalhada”, em oposição ao conceito de cidade compacta ou “fortaleza em cima do morro”, conforme observado com a conceitualização da cidade feita a partir do mapa de Ourique, de 1842 (ver Kuvasney, 2015). Além disso, a escala de 1:20.000, pela primeira vez utilizada, para conter o patrimônio municipal, se manteve como norma nas demais plantas que, apesar de não seguirem a figuração dos loteamentos da planta de 1897, mantiveram a figuração da cidade espalhada, até que não mais era viável aquela escala, pois a cidade se espalhara para além das terras do patrimônio. **O conceito de cidade espalhada se estabeleceu e naturalizou-se como modelo para todo o território do município.**

À guisa de conclusão

O mapa tem maior capacidade comunicativa do que o próprio território e acaba assumindo o lugar desse território, afinal, como disse Bruno Latour (1985, p. 21): “a história das ciências e técnicas é, em boa parte, a dos enganos que permitem conduzir o mundo sobre esta superfície de papel”. Essa é a mimetização a que se refere o título

do capítulo final (*O território paulistano apropriado e mimetizado*). O fato de o mapa ser um mecanismo de representação capaz de *mimesis*, significa que ele contém uma equação implícita: mapa = território. E aí chegamos à terceira série de mapas, aqueles que circularam compondo os cartazes da Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (CGGSP) pelas exposições.⁹ Esses cartazes (Figura 6) contrapõem as duas conceitualizações, a de cidade compacta, do século XIX e a de cidade espalhada, do século XX, como a dizer aos milhares de pessoas que os viam nas exposições que a modernidade implicava em progresso e o progresso da cidade implicava em seu espraiamento. Assim, “naturalmente” aceito, este espraiamento também naturalizou a cidade social e territorialmente desigual, transformando o território do município em gigantesca zona urbana, repleta de equipamentos urbanos no centro e que vão rareando conforme nos afastamos dele, até chegar nas periferias distantes, repletas de ‘vazios’ de equipamentos, vazios repletos de gente, como a recordar as várzeas do início do século XX.

Por fim, **uma palavra sobre as metodologias de análise** – desconstrução e semiose cartográfica: estas podem enriquecer as análises dos documentos cartográficos numa perspectiva de revisão da importância dos mesmos (foi isso o que procuramos fazer aqui: “desqualificar” a planta de 1897 como planta, utilizada inúmeras vezes como a verdade do território em 1897, quando, na verdade, tratou-se de um plano de cidade futura). Quanto aos processos de desconstrução, se pensarmos nos aspectos autorreferenciais, podemos, ao associar os métodos da semiose cartográfica a eles, analisar como o documento individual ou a série interferiram na forma de pensar e organizar o território (como ocorrido com aquela planta e toda a série que a seguiu). O que vemos por meio da semiose cartográfica é um passo adiante nas análises desconstrutivistas. O foco principal das análises de J.B. Harley, de que os mapas são “imagens carregadas de intenções e consequências que podem ser estudadas nas sociedades de seu tempo”, de que mapas são instrumentos de saber-poder, se tornou restritivo na medida em que se observa que os mesmos são “instrumentos miméticos que vão além de seus fins pretendidos e se elevam acima das questões culturais que originalmente os moldaram” (Casti, 2005, p. 5). Os conceitos de *autorreferencia* e *iconização* enriquecem as análises desconstrutivistas, pois trazem nova perspectiva à essas análises. De uma forma extremamente reducionista, porém didática, o que muda é a forma unívoca de ver o mapa como “instrumento feito por alguém com um objetivo territorial”, para um “instrumento feito por alguém com um objetivo territorial, mas que pode ser interpretado de outra forma e esta forma pode interferir/alterar

⁹ Plantas da Cidade de São Paulo mostrando seu desenvolvimento. Comissão Geographica e Geologica, 1922. Escala: 1:20.000. APESP. Disponível em: <http://www.arquivos-tado.sp.gov.br/site/acervo/repositorio_digital/mapa_carto/BR_APESP_IGC_IGG_CAR_I_S_0207_001_001>.

o território”, como observado aqui, quando a falsa descrição da cidade, em 1897, acabou por conceitualizar a forma da cidade a partir desse momento.

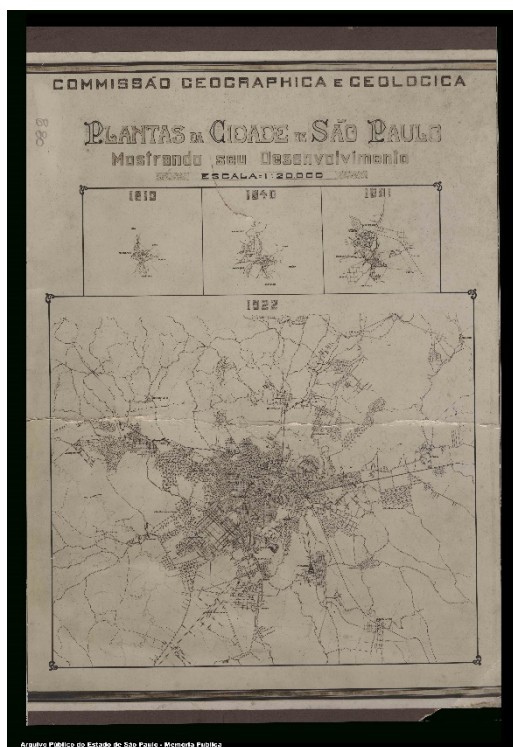


Figura 6. Uma das séries produzidas como cartazes pela CGGSP para serem enviadas às exposições nacionais e universais. Esta, feita para a Exposição Nacional de 1922, mantém o título das anteriores. “Plantas da cidade de S. Paulo mostrando seu desenvolvimento”.

Com este trabalho, espera-se que as releituras dos documentos cartográficos apresentadas possam produzir mudanças na forma de utilização dos mapas históricos pelos pesquisadores das ciências humanas e sociais aplicadas. É importante que os pesquisadores olhem para o mapa como um documento de seu tempo, produzido com objetivos específicos e, principalmente, compreendam que seu estatuto de imagem vai muito mais além da simples e equivocada “verdade do território”.

Bibliografia

Araujo, Iris Morais (2006). “Versões do ‘progresso’: a modernização como tema e problema do fotógrafo Militão Augusto de Azevedo (1862-1902)”, dissertação de Mestrado em Antropologia, São Paulo, FFLCH-USP.

- Barbosa, Maria do Carmo B. (1987). “Tudo como dantes no quartel de Abrantes. Práticas de produção do espaço na cidade de São Paulo (1890-1930)”, tese de doutorado, FAU-USP, São Paulo.
- Bernardini, Sidney Piochi (2007). “Construindo infraestruturas, planejando territórios: a Secretaria de Agricultura, Comércio e Obras Públicas do governo estadual paulista (1892-1926)2”, tese de doutorado, FAU-USP.
- Besse, Jean-Marc (2006). “Cartographie et pensée visuelle. Réflexions sur la schématisation graphique”, Colóquio *Expériences de terrain et compétences cartographiques*. Maison Interuniversitaire des Sciences de l’homme – Alsace/Agence Nationale de la Recherche, Strasbourg, 9 juin 2006. Disponível em: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/67/10/PDF/Cartographie_et_pensee_visuelle.pdf>.
- Besse, Jean-Marc (2009). *Mapping, Constructing, Inventing: on de notion of project and its epistemology*, First published in Le Goût du monde. Exercices de paysage. Actes Sud/ENSP, pp. 149-188. Disponível em: <<https://univ-paris1.academia.edu/JeanMarcBesse>>.
- (2014). *Totalidade e dispersão. O atlas geográfico e as figuras da racionalidade*. Texto elaborado para o curso: Escrever a história da geografia moderna. Questões epistemológicas, problemas historiográficos, FFLCH-USP, Trad. Eliane Kuvasney.
- Brunet, Roger (1990). “Mondes nouveaux”, tomo 1 da *Géographie Universelle*, Paris, Belin/RECLUS.
- Casti, Emanuela (1998). *L’ordine del mondo e la sua rappresentazione. Semiosi cartografica e autoreferenza*, Milão, Unicopli.
- (2005). “Towards a Theory of Interpretation: Cartographic Semiosis”, *Cartographica*, vol. 40, n.º. 3, pp. 1-16.
- Dutenkefer, Eduardo (2016). “Metodologia para um saber e um fazer geo-histórico: análise de espacialidades pretéritas utilizando instrumentos computacionais”, *Revista do Instituto de Estudos Brasileiros*, n.º. 65, pp. 57-71.
- Fonseca, Fernanda P. et al. (2016). “Cartografia digital geo-histórica: mobilidade urbana de São Paulo, de 1877 a 1930”, *Revista do Instituto de Estudos Brasileiros* n.º. 65, pp. 131-166.
- Fonseca, Fernanda Padovesi (2004). *A Inflexibilidade do Espaço Geográfico. Uma questão para a Geografia*, Tese de Doutorado, PPGH-USP.
- Gagnebin, Jeanne-Marie (1993). “Do conceito de Mimesis no pensamento de Adorno e Benjamin”, *Perspectivas*, São Paulo, no. 16, 1993, pp. 67-86.
- Harley, J. Brian. (2009). “Mapas, saber e poder”, *Confins* [Online], n.º. 5. Disponível em: <<http://confins.revues.org/5724>>
- Harley, J. Brian (2005). *La Nueva Naturaleza de los Mapas. Ensayos sobre la historia de la Cartografía*, Fondo de Cultura, México.

- Harley, J. Brian and Woodward, David (orgs.) (1987). *The History of Cartography*, vol. 1, Chicago, University of Chicago Press. Disponível em: <http://press.uchicago.edu/books/HOC/HOC_V1/Volume1.html>.
- Kuvasney, Eliane (2015). “O mapa da fortificação da cidade de São Paulo por ocasião da Revolta Liberal de 1842. Contexto e usos atuais”, *Confins* n.º. 25. Disponível em: <<http://confins.revues.org/10524>>.
- Kuvasney, Eliane (2017). *A representação da cidade de São Paulo nos albores do século XX. Os mapas como operadores na construção da cidade espraiada*, tese doutorado em Geografia, FFLCH-USP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-26042018-135249/pt-br.php>>.
- Latour, Bruno (1985). “Les ‘vues de l’esprit’: une introduction à l’anthropologie des sciences et des techniques”, *Culture technique*, n.º. 14.
- Leite, Mateus Pavan de M. (2016). “Jules Martin, Litógrafo: catálogo iconográfico de um comerciante de imagens de São Paulo”, dissertação de mestrado, IFCH-UNICAMP, Campinas.
- Lévy, Jacques e Lussault, Michel (2000). *Logiques de l’espace, Esprit des lieux*, Paris, Belin, Coleção Mappemonde.
- Lima, Erly Caldas de (2013). *O levantamento pioneiro do SARA Brasil: Histórico, tecnologia empregada e avaliação dos productos*, dissertação de mestrado, POLI-USP, São Paulo.
- Lussault, Michel (1995). “La ville Clarifiée”, in Cambrézy, Luc e Maximy, René, *La Cartographie em debat: représenter ou convaincre*, Paris, Éditions Karthala.
- Lussault, Michel (2007). *L’Homme Spatial. La construction sociale de l’espace humain*, Paris, Édition du Seuil, 2007.
- Mendes, Ricardo (2014). “S.A.R.A. Brasil: restituindo o Mapa Topográfico do Município de São Paulo”, *Informativo Arquivo Histórico de São Paulo*, 10(37). Disponível em: <www.arquivohistorico.sp.gov.br>, acesso em jun/2015.
- Morris, Charles (1985). *Fundamentos de la teoría de los signos*, Buenos Aires, Ediciones Paidós.
- Oliva, Jaime e Fonseca, Fernanda Padovesi (2011). “Reflexões sobre o urbano, a cartografia e a iconografia: o caso da metrópole de São Paulo”, *Revista Geografia e Pesquisa*, Ourinhos, vol. 5, n.º. 2, pp. 11-38.
- Oliva, Jaime e Fonseca, Fernanda Padovesi (2016). “O ‘modelo São Paulo’: uma descompactação antiurbanidade na gênese da metrópole”, *Revista do Instituto de Estudos Brasileiros*, n.º. 65, pp. 20-56.
- Palsky, Gilles (2003). “L’Esprit des Cartes. Approches historiques, sémiologiques et sociologiques en cartographie. Diplôme d’habilitation à diriger des recherches”, vol. 2, *Memoire de Synthèse*, Université de Paris XII, Val de Marne.

- Panier, Louis (s/d), *Ricouer et la Semiotique*. Disponível em: <http://halshs.archive-souvertes.fr/docs/00/35/36/43/DOC/Panier_Ricoeur_semotique.doc>, acesso em 28/02/2014.
- Panofsky, Erwin (1976). *Estudios sobre Iconologia*, Madrid, Alianza Editorial.
- Peirce, Charles S. (2005). *Semiótica*. São Paulo, Perspectiva.
- Santos, Milton (2002). *A natureza do espaço*. São Paulo, Edusp.
- Simoni, Lucia Noemia (2002). “O arruamento de terras e o processo de formação do espaço urbano no município de São Paulo, 1840-1930”, tese de doutorado, FAU-USP, São Paulo.
- Souza, José Inácio de Melo (2014). “José de Sá Rocha: engenheiro municipal -uma trajetória pessoal e a formação de um corpo técnico para gestão da cidade”. *Informativo Arquivo Histórico de São Paulo*, 9(35). Disponível em: <www.arquivohistorico.sp.gov.br>, acesso em 08/2015.
- Turco, Angelo (2006). “Mythos e techne: a função intercultural do território na África subsaariana”, *Novos Cadernos NAEA*, vol. 9, nº. 1, pp. 5-24, Belém.

Accesibilidad peatonal a los servicios educativos de la ciudad de Ibagué-Tolima, Colombia

Mailen Stephany Alvarez Rojas*

Elia Quirós Rosado*

José Antonio Gutiérrez Gallego*

Recibido el 20 de agosto de 2018; aceptado el 30 de diciembre de 2018

Abstract

This article shows the analysis of pedestrian accessibility of the school-age population between 5 and 14 years old, towards the educational centers that offer the basic primary and basic secondary levels in the city of Ibagué. For the development of the study, information was provided on the city's road network, the population census for 2005 blocks and the educational centers of the urban area with their offer for 2017. The spatial and demographic understanding of the city together with the application of minimum time indicators, absolute accessibility and cumulative opportunities, they allow for an integral analysis taking into account the supply-demand for education. Based on the results obtained, a diagnosis is generated that evaluates the degree of accessibility that the school-age population has and the coverage that the educational centers have over the territory.

Key words: *Pedestrian accessibility, basic education, geographic information systems, accessibility indicators.*

Resumen

Este artículo muestra el análisis de accesibilidad peatonal de la población en edad escolar entre los 5 y 14 años, hacia los centros educativos que ofrecen los niveles de básica primaria y básica secundaria en la ciudad de Ibagué. Para el desarrollo del estudio, se contó con información de la red vial de la ciudad, el censo poblacional

* Universidad de Extremadura, Departamento de Expresión Gráfica, Escuela Politécnica, Avda. de la Universidad s/n 10071 Cáceres, España, correo electrónico: malvarezpv@alumnos.unex.es

por manzanas de 2005 y los centros educativos del casco urbano con su oferta hacia el 2017. La comprensión espacial y demográfica de la ciudad junto con la aplicación de los indicadores de tiempos mínimos, accesibilidad absoluta y oportunidades acumuladas, permiten realizar un análisis integral teniendo en cuenta la oferta -demanda educativa. A partir de los resultados obtenidos, se genera un diagnóstico que evalúa el grado de accesibilidad que posee la población en edad escolar y la cobertura que los centros educativos tienen sobre el territorio.

Palabras clave: *Accesibilidad peatonal, educación básica, sistemas de información geográfica, indicadores de accesibilidad.*

Resumo

Este artigo mostra a análise da acessibilidade pedonal da população em idade escolar entre 5 e 14 anos, em direção aos centros educacionais que oferecem os níveis básico primário e fundamental básico da cidade de Ibagué. Para o desenvolvimento do estudo, foram fornecidas informações sobre a malha viária da cidade, o censo demográfico para maços em 2005 e os centros educacionais do centro urbano com oferta para 2017. A compreensão espacial e demográfica da cidade juntamente com a aplicação de indicadores de tempo mínimo, acessibilidade absoluta e oportunidades acumuladas, permitem uma análise integral levando em conta a oferta-demanda por educação. Com base nos resultados obtidos, gera-se um diagnóstico que avalia o grau de acessibilidade da população em idade escolar e a cobertura que os centros educacionais têm sobre o território.

Palavras-chave: *Acessibilidade pedestre, educação básica, sistemas de informação geográfica, indicadores de acessibilidade.*

Introducción

Para Colombia, la educación es la formación permanente de cada individuo por medio de la concepción integral de los aspectos culturales, sociales, legales y humanos. Dicha formación inicia con la educación básica la cual atiende a la primera infancia y la adolescencia dentro de la clasificación del sistema educativo nacional (Ministerio de Educación Nacional, 2010). En este estudio, se muestra el diagnóstico a 2017 de la educación desde el nivel internacional hasta el nivel local (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO, 2011).

El factor desarrollado en pro de la equidad social y educativa en este artículo es la accesibilidad geográfica, evaluando las oportunidades que la población posee para acceder al servicio educativo. Para generar un producto claro sobre esta investigación, se analiza la influencia de la accesibilidad sobre dicho servicio en Ibagué, por medio de estudios previos realizados a nivel nacional e internacional, tanto para este

como para otros (salud, comercio, industria). Adicionalmente, se aplica un análisis de accesibilidad por medio de indicadores que se adaptan a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Este trabajo de investigación, muestra el análisis de accesibilidad peatonal de la población en edad escolar entre los 5 y 14 años, hacia los centros educativos que ofrecen la enseñanza en los niveles de básica primaria y básica secundaria en la ciudad de Ibagué. Para el desarrollo del estudio, se contó con la información de la red vial de la ciudad, el único censo poblacional que hasta el momento detalla su contenido por manzanas y data del año 2005 (Departamento Nacional de Estadística, 2017) y los centros educativos con su respectiva oferta hacia el 2017.

Objetivos

El principal objetivo de este estudio, es analizar la accesibilidad peatonal de la población en edad escolar a los centros de educación básica obligatoria en la ciudad de Ibagué. Para conseguirlo, la localización de dichos centros se incluye en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que junto con la cartografía y demografía de la ciudad permiten realizar el análisis de accesibilidad a partir del enfoque espacial y cuantitativo. Así mismo, se consideran las características de oferta y demanda de cada centro y a partir de algunos indicadores de accesibilidad se evalúa la cobertura espacial de los mismos sobre la zona urbana de la ciudad.

Antecedentes

El uso de los sistemas de información geográfica durante los últimos años, ha enfocado sus esfuerzos en evaluar la accesibilidad geográfica hacia de diferentes servicios que tienen el potencial de contribuir en el mejoramiento de la calidad de vida de la población (Villanueva, 2010). Los estudios de accesibilidad espacial a partir de los SIG tienen múltiples áreas de investigación. En España por ejemplo, se han realizado estudios en el campo del transporte y el acceso a servicios desde nivel local hasta nivel nacional que permiten la implantación de nuevas formas sostenibles de desplazamiento y limita el uso del vehículo privado (Mora Aliseda, Nogales Galán, Gutiérrez Gallego, y Cortés Ruiz, 2003), (Gallego, Labrador, Cabanillas, y Pintor, 2013) y (Gutiérrez Gallego, Berrocal Nieto y Ruiz Labrador, 2014).

Por otra parte, en México y Argentina se han llevado a cabo estudios de accesibilidad hacia servicios colectivos y de salud, para analizar desigualdades espaciales y distribución territorial como se observa en los estudios de accesibilidad geográfica al sistema de salud y educación de (Villanueva, 2010) y (Martínez Bascuñán y Rojas Quezada, 2014), unidades de servicio en general de una ciudad junto con fundamentos diseño y aplicación de (Garrocho y Campos, 2006).

Por otro lado en países como España, Canadá, Estados Unidos y Nueva Zelanda la accesibilidad se evalúa a través de las variables contextuales/ambientales que tienen los alumnos para decidir emplear desplazamientos activos y determinar su área de influencia (Chica Olmo, Rodríguez Lopez y Chillón, 2018). Estos análisis van acompañados de los efectos socio demográficos y psicológicos que implica elegir un modo de desplazamiento saludable (Larsen *et al.*, 2009) (Mandic *et al.*, 2015).

Gracias a este tipo de investigaciones, se han realizado programas de accesibilidad al espacio educativo fomentando la seguridad y la actividad física. Este planteamiento obliga a la unión de esfuerzos por parte del gobierno y los centros educativos a generar mejor infraestructura para las poblaciones y mejores condiciones de movilidad (Rossiter, 2013).

Material y método

El área de interés para el estudio es la ciudad de Ibagué también conocida como la “capital musical de Colombia”. Es la capital del departamento del Tolima, localizado sobre la cordillera central de los Andes a 1 285 msnm en el centro oriente del país, a 207 km de Bogotá. Es una ciudad intermedia con 533 361 habitantes en la zona urbana hacia el 2016. Actualmente, su división política administrativa contempla 13 comunas (Figura 1). Su tasa de crecimiento demográfica más alta tuvo lugar entre los años de 1951 y 1964 por el fenómeno de la violencia que forzaba el desplazamiento de la población de las zonas rurales hacia las ciudades (UN, CEPAL, CELADE, 2003). El 25% de la población total de Ibagué, se encuentra en edad escolar con edades entre los 5 y 14 años (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, s.f.).

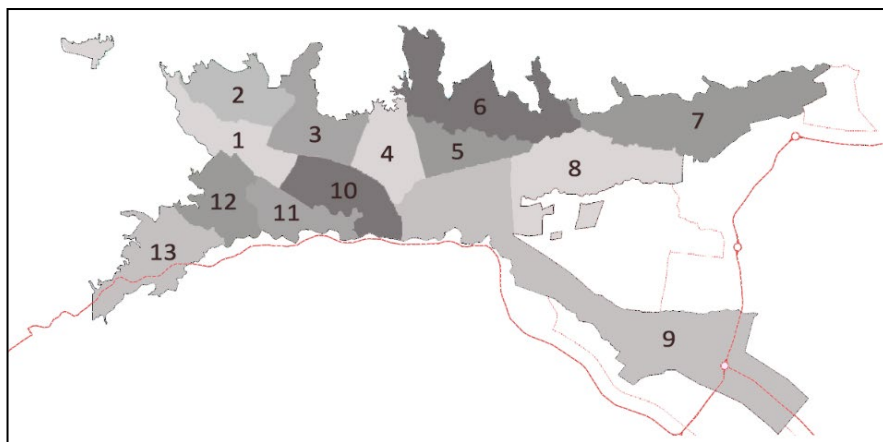


Figura 1. División político administrativa de Ibagué (Comunas). Elaboración propia en base a la Cartografía del Acuerdo 0823 de 2014 (Plan de ordenamiento territorial).

En el entorno educativo, se identifica que los niveles de básica primaria y secundaria poseen la mayor participación sobre el territorio con un 75% (Alcaldía de Ibagué, 2015) y coincide con el interés de este estudio en examinar la disponibilidad y accesibilidad a establecimientos que dicten dichos niveles. Este estudio posee una muestra de 201 centros educativos entre oficiales y privados sobre la zona urbana de Ibagué; en la Figura 2 se muestra la distribución espacial de los mismos.

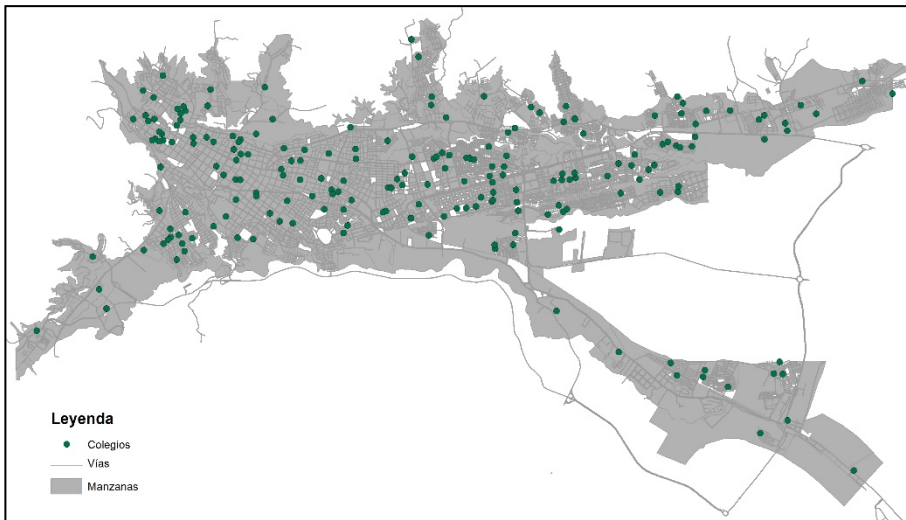


Figura 2. Ubicación espacial de centros con educación básica primaria y secundaria. Elaboración propia a partir de listado Oficial de instituciones educativa de la Gobernación del Tolima 2017 y cartografía obtenida en el Geoportal del DANE.

Recolección de datos

En principio, se obtuvo el plano vial del casco urbano de Ibagué por medio de la plataforma Open Street Map, a partir de este se filtró la información que contenía vías y senderos peatonales (Fundación Open Street Map, 2017). Dicho plano se apoyó en la cartografía de la ciudad estructurada por manzanas catastrales y obtenidas en el Geoportal DANE por código identificador de cada manzana y su área por medio del sistema de referencia MAGNA-SIRGAS “WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere”.

La información demográfica por manzanas se consultó en el “Sistema de Consulta de Información Censal”, que por medio de categorías filtra toda la información del único censo completo en Colombia que data del año 2005 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2007). Posteriormente, se identificó la información de grupos quinquenales por manzanas y formato de salida en tabla. De esta

manera, la información se unió a la cartografía obtenida por medio del código de manzana y la información catastral en común.

Por otra parte, se obtuvo el listado oficial de instituciones educativas con las matrículas registradas a 2017 a través de la Gobernación del Tolima. Este listado identifica los grupos quinquenales por niveles de educación preescolar, básica y media. En este estudio se tuvieron en cuenta las plazas de los niveles de básica primaria y secundaria con población entre los 5 y 14 años. Adicionalmente y por medio de “Google Earth”, “Google Street View” y el listado de colegios obtenidos, se reubicaron y georreferenciaron los centros educativos sobre la ciudad.

Posteriormente el estudio es dividido en dos etapas: la primera contemplando los centros educativos en términos generales, es decir, públicos y privados; y la segunda hacia los centros educativos oficiales, es decir de administración pública, que corresponden a la enseñanza gratuita y obligatoria de la educación básica. Para generar la unión entre la ubicación espacial y las plazas de cada centro educativo, se generó un identificador según la categoría del establecimiento de la siguiente manera:

- 1000 - Centros
- 1100 - Colegios
- 1200 - Gimnasios y Gimnasios infantiles
- 1300 - Instituciones educativas
- 1400 - Jardines Infantiles
- 1500 - Liceos

De esta manera la unión contiene 201 centros educativos con: el código identificador, el nombre del establecimiento, el número de plazas totales, en número de plazas por educación básica primaria y secundaria y las coordenadas georreferenciadas X y Y.

En la segunda etapa del análisis solo se tienen en cuenta los centros educativos oficiales, por tanto se filtra el listado de la primera etapa solo con el identificador “1300” que corresponde al nombre de “Instituciones Educativas” y son responsabilidad de la administración pública de la ciudad. En esta etapa se obtiene un listado de 48 centros.

Procesamiento de datos

Las variables empleadas para el análisis de accesibilidad peatonal se calcularon con el apoyo ArcGIS. El proceso requiere implantar los datos obtenidos (Cartografía, demografía y educación) para la modelización del sistema urbano por medio del sistema de referencia MAGNA-SIRGAS “WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere”.

En primer lugar, se determinó la densidad poblacional general y se realizó un contraste con la densidad de la población escolar (5-14 años) de forma espacial y

cuantitativa presentada en planimetría vectorial por medio de la división del número de habitantes de cada manzana sobre su área. La densidad poblacional permitió analizar el acceso a los centros educativos a partir de la concentración de población en los diferentes puntos de la ciudad. Los campos incluidos dentro de esta planimetría contienen: el identificador de manzana, el número de habitantes por edades y la densidad poblacional expresada en hab/m².

En segundo lugar se asignó la impedancia sobre la red vial. El término impedancia hace referencia “a la resistencia al movimiento en un intervalo determinado y es el resultado de la longitud de los tramos sobre la velocidad del recorrido” (Loyola Gómez y Albornoz del Valle, 2009). En este análisis de accesibilidad el valor medio contemplado para la velocidad peatonal es de 4,5km, soportado en el estudio de (Munoz-Raskin, 2010). Posteriormente, se realizó el cálculo de la topología sobre la red creando nodos que verificaron la unión de la misma.

Por último, se definieron centroides por manzanas, es decir la población en la manzana como elemento puntual al igual que la representación de los centros educativos. De esta manera, se realizó un cálculo sobre la red por medio de la herramienta “Closet Facility” en la cual se muestran las rutas óptimas desde cada centro de manzana a cada uno de los 201 centros educativos en la primera etapa y los 48 centros oficiales en la segunda. Junto con ella se generó la matriz Origen Destino (OD), tomando como origen los centros de manzana y destino los centros educativos, de esta manera se obtiene la información correspondiente al tiempo de recorrido y distancia por medio de la red vial.

Aplicación de indicadores de accesibilidad

Una vez extraídos los tiempos de viaje, se seleccionan los indicadores que relacionen los factores físicos y sociales para analizar la accesibilidad peatonal hacia los centros educativos. Para determinar el uso correcto de los mismos, es importante tener claro el campo, la escala de aplicación, el tipo de desplazamiento, etc. (Monzon de Caceres, 1988). La distancia es el factor común entre los indicadores de origen-destino y la impedancia, puesto que la movilidad no es ilimitada (Martínez Sánchez-Mateos, 2012). Para este estudio se analizaron los tiempos mínimos de acceso, la accesibilidad absoluta, el indicador de oportunidades acumuladas en el análisis y la demanda potencial a cada centro educativo.

Debido a las implicaciones que requiere analizar la accesibilidad se han desarrollado múltiples indicadores para conseguirlo. Es importante tener claro el campo y la escala de aplicación, para seleccionar el indicador correcto; En el estudio realizado por (Monzon de Caceres, 1988) se incluye una clasificación comprensible de los indicadores según los criterios anteriores, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Clasificación de Indicadores de Accesibilidad

Topológicas	Tipología del tramo de la red Medidas de Trazado Medidas de oposición al desplazamiento
De viaje	Utilización de Itinerario Probabilidad de producirse
Agregadas	Gravitacional Máximo beneficio del usuario
Desagregadas	Oportunidades acumuladas Tiempo-Espacio geográfico
Basadas en Transporte Público	Zona urbana Zona rural

Fuente: elaboración propia en base a Monzon de Caceres, 1988.

Medidas desagregadas

Este grupo de indicadores consideran el desplazamiento de un elemento individual, ya sean personas o vehículos por la red vial y no tienen presentes el resto de los elementos. Se utilizan para analizar el número de destinos que puede alcanzar un determinado usuario desde orígenes concretos (Monzon de Caceres, 1988).

Indicador de Tiempos Mínimos

Es el cálculo del tiempo mínimo desde cualquier centro de manzana como origen hacia el centro educativo más cercano. Para esto se tuvo en cuenta, además de la distancia, la red vial y la velocidad media del peatón andando: 4.5 km/h (Munoz-Raskin, 2010).

Indicador de Accesibilidad Absoluta

Este indicador es sensible a la localización geográfica de los nodos, mide el grado de interconexión de un punto con el resto de puntos de la región estudiada basándose en el coste del transporte y en los modelos potenciales de mercado primando siempre las zonas centrales. Para este caso se calculó el promedio de las impedancias que separan a cada elemento puntual que concentra la población en las manzanas respecto a los centros educativos a través de la red, además se considera la capacidad de cada centro como factor de ponderación a partir de la Ecuación (1).

$$IAA = \frac{\sum_{j=1}^n (I_{Ij} * CC_j)}{\sum_{j=1}^n CC_j} \quad (1)$$

Donde:

Iij: es el tiempo mínimo entre los nodos *ij*, a través de la red, es decir, la impedancia entre origen y destino.

CCj: es la capacidad educativa de cada centro sobre la zona urbana.

El respaldo gráfico de este indicador es un mapa vectorial que en conjunto con la información tabular representan por tonalidades el nivel de accesibilidad que se posee hacia la zona de mayor actividad.

Indicador de Oportunidades Acumuladas

En este indicador se contabilizó la cantidad de población escolar entre los 5 y 14 años que está a 15 minutos de distancia, con respecto a uno o varios centros educativos, definiendo la demanda potencial existente en su entorno; esta se contrasta posteriormente con la capacidad de plazas que posea cada colegio.

Resultados y discusión

Para generar un diagnóstico global de la accesibilidad al servicio educativo hacia los centros, se requirió de una visión espacial y cuantitativa de los resultados que tiene en cuenta la localización e implicaciones de desplazamiento junto con la oferta y demanda de cada uno. El método de estudio por indicadores en este análisis, amplió la idea de que la accesibilidad está ligada únicamente con la ubicación de los centros, definiendo la cobertura educativa y la capacidad de atención por sectores.

Densidad poblacional general y escolar

Este indicador permitió observar la configuración espacial de la ciudad, en primera instancia con la distribución de la población sobre el territorio y en segunda la población en edad escolar entre 5 y 14 años que reciben la educación básica primaria y secundaria (Figura 3); su unidad de medida se representa en hab/km².

A nivel espacial, ambas densidades se ajustan en distribución geográfica sobre el territorio, lo que permite identificar integración de la población sin discriminación por edades.

A nivel cuantitativo por medio de la Figura 4, se puede analizar que la densidad escolar media es de 6 448 hab/Km² y representa el 20% de la densidad poblacional general. También se muestra que el 18% de las manzanas que posee una densidad baja entre los 10 a 2 500 hab/km², seguido de un 63% que concentra una densidad media entre 2 500 a 9 500 hab/km². Finalmente un 18% con una densidad alta superior a dicha cifra.



Figura 3. Densidad de la población entre los 5 y 14 años de Ibagué. Elaboración propia en base al censo poblacional 2005, DANE.

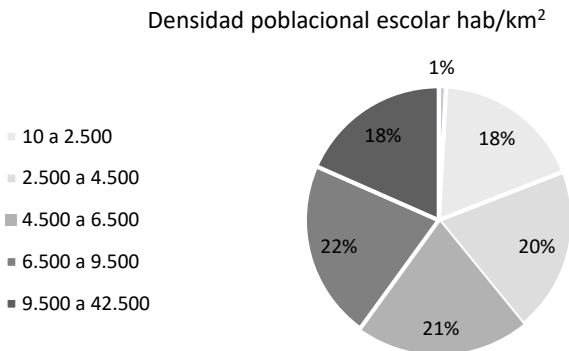


Figura 4. Diagrama por sectores de la densidad poblacional escolar. Fuente: elaboración propia a partir de DANE, 2005.

Indicadores: Centros educativos generales

Indicador de tiempos mínimos

En la Figura 5 se muestra el mapa de tiempos mínimos de acceso peatonal desde cualquier manzana al centro educativo más cercano. A través de este indicador se

observa el grado de accesibilidad que posee la población por sectores a los centros educativos más cercanos.

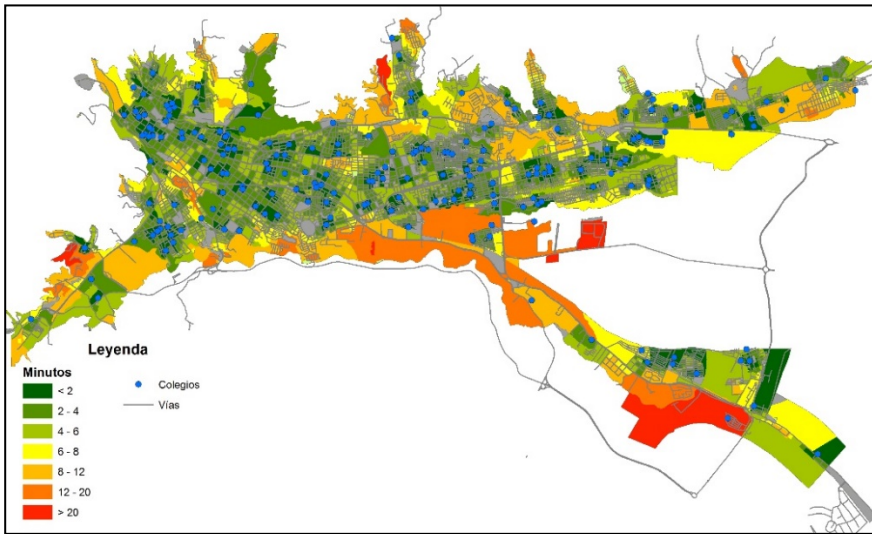


Figura 5. Indicador de Tiempos Mínimos de acceso peatonal hacia los Centros Educativos de Ibagué.

Espacialmente, se observa que gran parte de la ciudad posee una accesibilidad alta a menos de seis minutos hacia los centros educativos, representada en tonos verdes. Este patrón se presenta sobre el cuerpo central de la ciudad y se pierde sobre la periferia en las comunas 7, 9 y 13 cuando la accesibilidad corresponde a un desplazamiento entre 6 a 20 minutos andando, representado en tonos amarillos y naranjas. Por otra parte, existen zonas puntuales sin configuración previa que tienen una accesibilidad mayor a 20 minutos representadas en color rojo, estas se ubican sobre la periferia y su presencia es mínima respecto al resto del territorio. Las zonas con un tono gris, corresponden a aquellas que no tienen información poblacional, por ser espacio público o equipamientos colectivos.

Cuantitativamente, se confronta la distribución del porcentaje de población por medio de la Figura 6 y se obtiene que más del 80% de la misma tiene un colegio a menos de seis minutos de distancia, situándose geográficamente sobre el cuerpo principal de la ciudad y algunas zonas de la periferia como se observa en la Figura 4. En algunos sectores, la accesibilidad supera los seis minutos y se debe a la falta vías alternas de comunicación. Solo un porcentaje inferior al 1% posee una accesibilidad baja mayor a 20 minutos andando, estas hacen referencia a zonas que están en proceso de consolidación o en las que carecen de vías comunicación como en las comunas 7, 9 y 13.

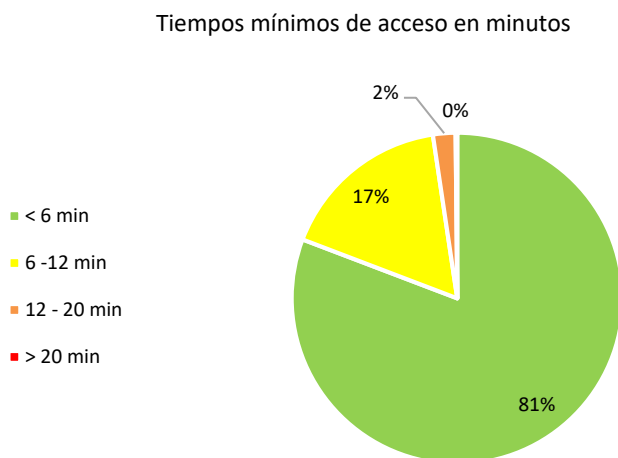


Figura 6. Diagrama por sectores del grado de accesibilidad en el indicador de Tiempos Mínimos.

Indicador de accesibilidad absoluta

Este indicador muestra el grado de accesibilidad peatonal según la localización de la población al conjunto de centros educativos. A partir de la zona central se generan cinco anillos concéntricos que reducen el grado de accesibilidad conforme llegan a las periferias. De esta manera, el indicador cumple el principio de “centro-periferia” mostrando que la población localizada en el centro de la ciudad, tiene mayor posibilidad de acceso al conjunto de centros educativo que los ubicados en alguna isla periférica.

A nivel espacial, se observa que dicho principio corresponde con una alta accesibilidad en el centro de la ciudad y es representada por tonos verdes sobre las comunas 4 y 5 junto con partes de las comunas 6 y 10; a medida que se extiende, el grado de accesibilidad disminuye concentrándose en rojo como se observa sobre las comunas 7, 9 y 13 en la Figura 7. La característica particular de estas zonas es la configuración territorial respecto al cuerpo principal de la ciudad lo que genera reducción significativa de vías de comunicación. Desde un enfoque cuantitativo, se observa en la Figura 8 una media aproximada del 33.31% sobre la distribución de accesibilidad Alta, Media y Baja confirmando el principio de centro periferia. Sin embargo, la baja accesibilidad posee un aumento del 2% por encima de dicha media que afecta a las comunas periféricas 7, 9 y 13.

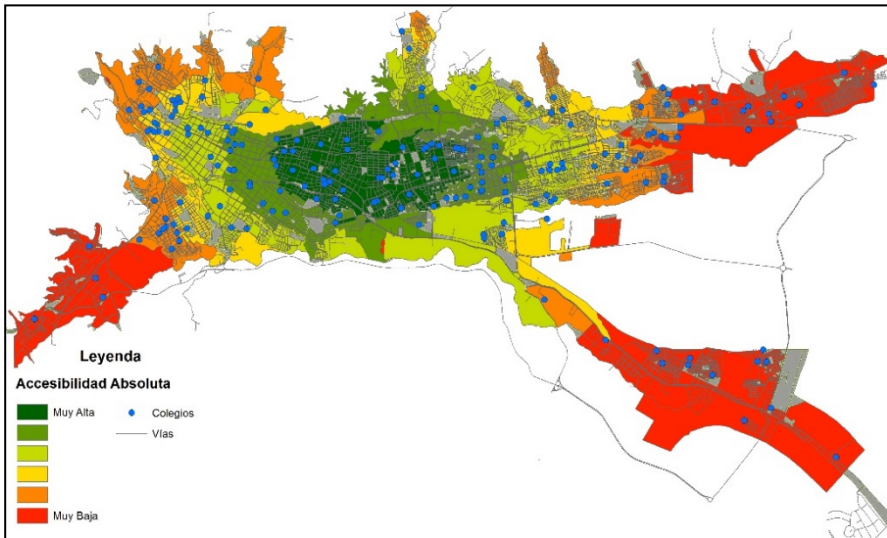


Figura 7. Indicador de Accesibilidad Absoluta peatonal hacia los Centros Educativos de Ibagué.

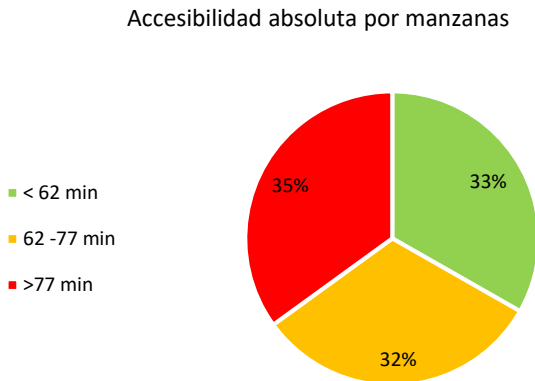


Figura 8. Diagrama por sectores del indicador de Accesibilidad Absoluta por minutos.

Demanda potencial a cada centro educativo

En este cálculo, se define para cada centro educativo la demanda de población escolar entre los 5 y 14 años más cercana por manzanas. Este indicador permite realizar una

comparación con la oferta de cada centro y evaluar la capacidad de atención hacia la población inmediata.

En la Figura 9 se muestra la localización de los centros educativos a partir de la demanda cercana a cada uno por sector. Además, se observa que los centros con una población cercana menor a los 800 habitantes se distribuyen linealmente sobre el centro de la ciudad y los superiores a esta cifra se localizan sobre las zonas más densas correspondientes a sectores de las comunas 2, 6, 7, 8 y 12.

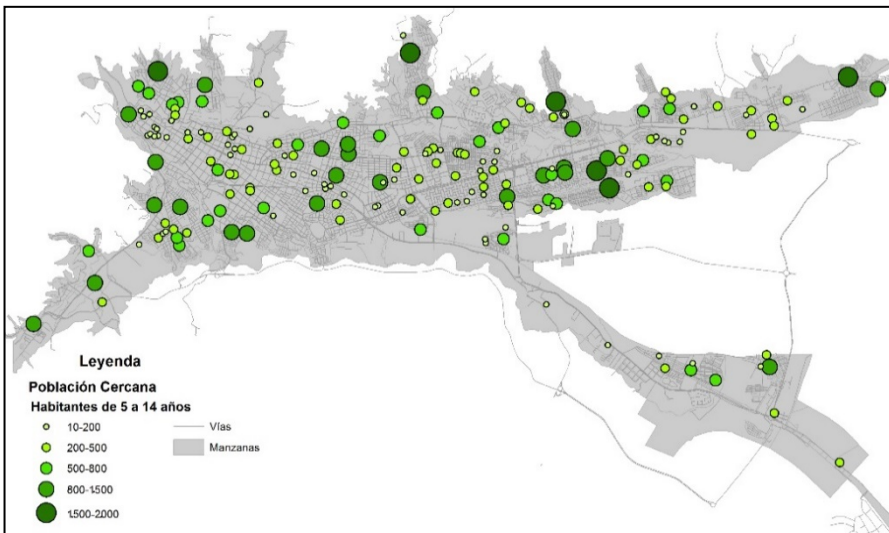


Figura 9. Población Potencial Cercana a cada Centro educativo.

De forma cuantitativa a través de la Figura 10, se encontró que el 80% de los centros tiene una población cercana menor de 800 habitantes y se localizan sobre el cuerpo principal de la ciudad, seguido del 20% que posee una demanda superior a dicha cifra y su localización es dispersa. También, se obtiene que la media de la población cercana es de 426 habitantes, y se distribuye de forma constante sobre el diagrama de líneas. Adicionalmente, se confirma que, de los 201 centros educativos, solo el 29.95% supe la demanda existente en su sector, el resto de centros posee tasas de ocupación entre el 150% y el 920 %, superando la oferta de la mayoría de centros.

Indicadores de oportunidades acumuladas a 15 minutos

Por medio de este indicador se determina la posibilidad que tiene la población escolar en acceder peatonalmente a cualquier centro educativo a menos de 15 minutos.

Espacialmente por medio de la Figura 11, se muestra que la población del cuerpo central de la ciudad tiene más posibilidad de acceso a varios centros educativos con

templando cifras entre los 1 500 a 9 000 habitantes. Los centros con mayor demanda entre los 7 000 y 9 000 habitantes, corresponden con la densidad poblacional escolar expuesta en la Figura 4. Por otra parte, se observa que las comunas 9 y 13 presentan demandas inferiores a 1 500 habitantes por centro educativo.

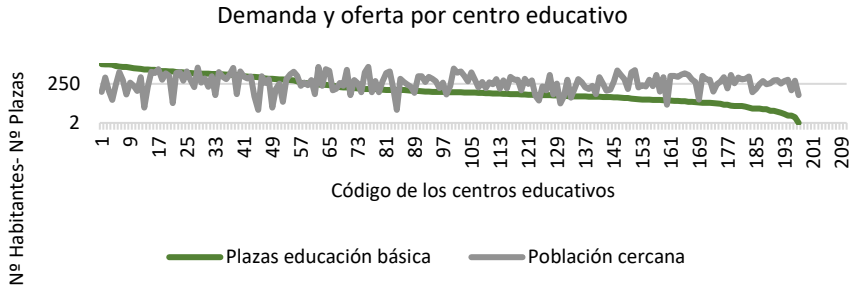


Figura 10. Diagrama de líneas que contrasta la oferta de cada centro educativo respecto a la demanda cercana por sector.

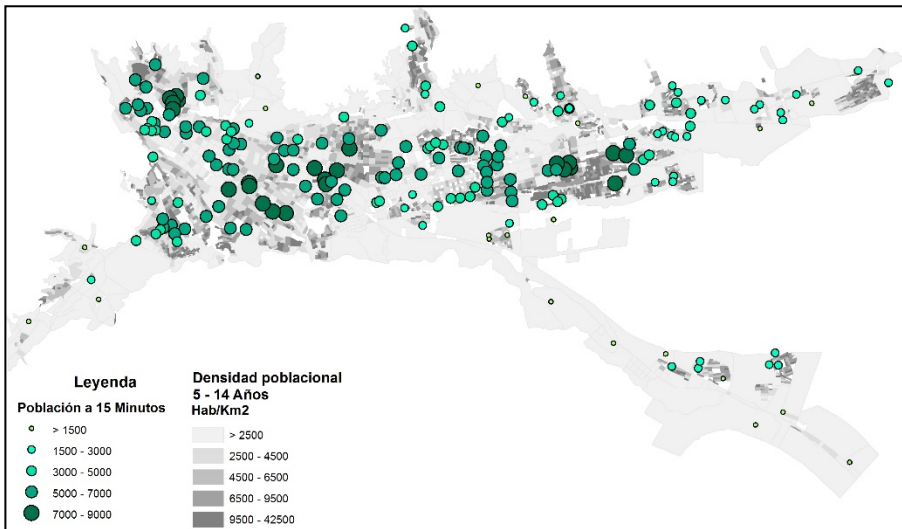


Figura 11. Indicador de Oportunidades acumuladas: Población potencial a menos de 15 minutos de los centros educativos en contraste con la densidad poblacional escolar.

Cuantitativamente se analiza por medio de la Figura 12, que la media de población demandante es de 4 368 habitantes en confrontación con la media de plazas ofertadas en los centros que son 368 superando casi en 11 veces su capacidad. Adicionalmente,

se obtuvo que el 46% de los centros educativos poseen una demanda cercana mayor a 5 000 habitantes a menos de 15 minutos de distancia, seguido de un 43% entre 1 500 y 5 000 habitantes, estos dos porcentajes se distribuyen sobre el cuerpo central de la ciudad. Finalmente, un 10.14% de los centros con población cercana menor a 1 500 habitantes que se ubica sobre la periferia. Respecto a la respuesta a esta demanda, solo el 4.3% de los centros tiene capacidad de atención, lo que implica desplazamiento de la población.

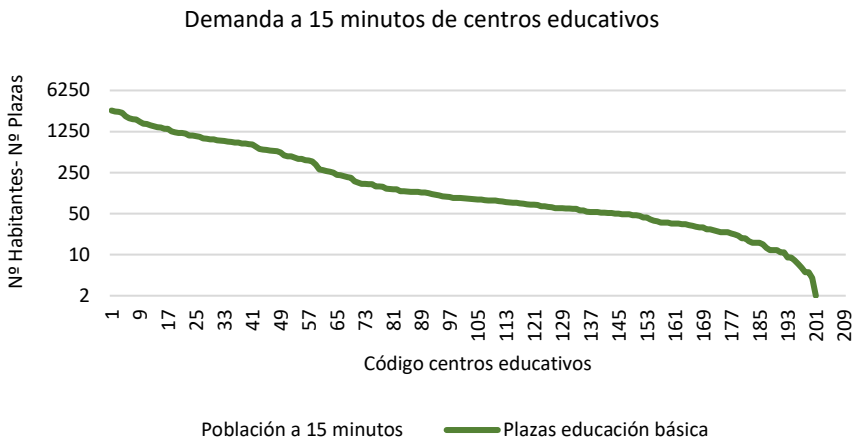


Figura 12. Diagrama de líneas que contrasta la oferta de cada centro educativo y la demanda potencial a 15 minutos de distancia.

Indicadores: Centros educativos oficiales

El desarrollo de esta etapa permite evaluar el estado de la accesibilidad a los centros educativos de carácter oficial que son administrados por el estado y deben brindar un servicio equilibrado y accesible a la población en edad escolar, por tanto tener la capacidad suficiente de atención a la demanda por sectores.

Distribución espacial de centros educativos oficiales

Por medio de la Figura 13 se muestra la distribución espacial de los 48 centros educativos de carácter oficial en la ciudad de Ibagué. Esta distribución, añade que existe baja presencia de centros sobre las comunas 1 y 4, ubicadas en el cuerpo central de la ciudad y sobre las comunas 7, 9 y 13 ubicadas en la periferia.

Indicador de tiempos mínimos

A nivel espacial y por medio de la Figura 14 los sectores con una accesibilidad alta inferior a los 10 minutos de un centro educativo se encuentran fragmentados en dos sobre la comuna 4 en el centro de la ciudad con accesibilidad reducida a un tiempo

entre los 10 a 15 minutos. Por otra parte, las comunas 3, 6, 7, 9 y 13 se afectan parcialmente entre los 15 y 20 minutos. Finalmente, sobre la comuna 9 se muestra como la accesibilidad baja es la más pronunciada con tiempos superiores a los 20 minutos.



Figura 13. Ubicación espacial de Centros con Educación Oficiales en la ciudad de Ibagué. Fuente: Elaboración propia a partir de listado Oficial de instituciones educativa de la Gobernación del Tolima 2017 y cartografía obtenida en el Geo portal del DANE.

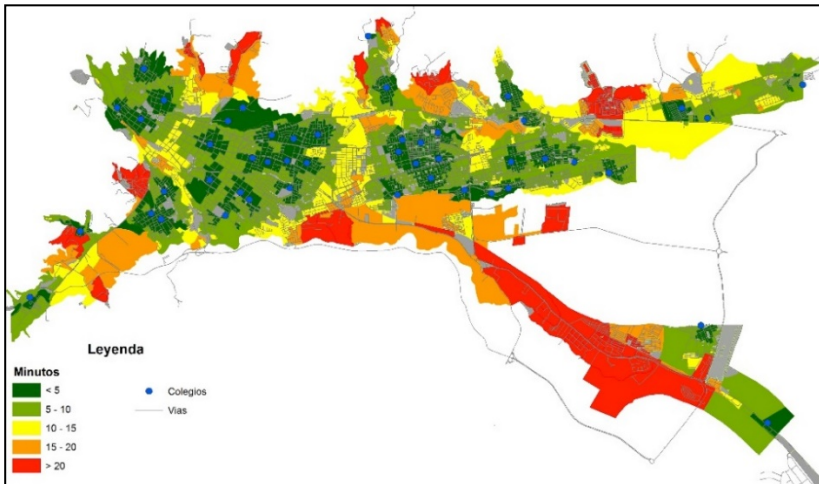


Figura 14. Indicador de Tiempos Mínimos de acceso peatonal hacia los Centros Educativos Oficiales de Ibagué.

En términos cuantitativos, por medio de la Figura 15 se observa que el 71% de la población posee un centro educativo oficial a menos de 10 minutos de distancia. Seguido de un 23% que comprende tiempos entre los 10 a 20 minutos andando; finalmente, se muestra un 6% de accesibilidad baja que supera los 20 minutos de desplazamiento peatonal.

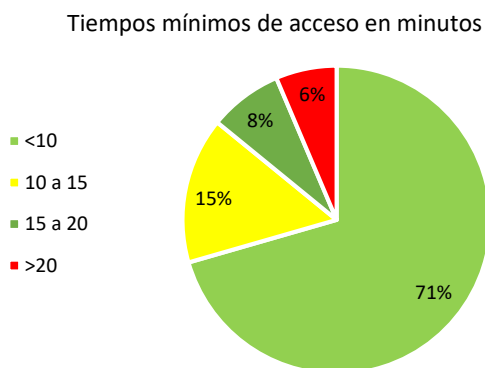


Figura 15. Diagrama por sectores del grado de accesibilidad en el indicador de Tiempos mínimos a los Centros Educativos Oficiales.

Indicador de accesibilidad absoluta

A través de la Figura 16 se observa el principio de centro-periferia característico de este indicador. Al mismo tiempo, se muestra que la accesibilidad alta es representada en tonos verdes y contempla distancias inferiores a los 51 minutos andando. Adicionalmente, se observa una accesibilidad baja representada en tonos cálidos sobre las comunas 7, 9 y 13 que indica tiempos superiores a 85 minutos. Adicionalmente, se demarcan dos tipos de secciones: las primeras en tono gris, dispersas irregularmente sobre la ciudad que representan zonas sin información demográfica que corresponden a espacio público o sectores sin desarrollo urbanístico. La segunda en rojo, que muestran zonas con dificultad de accesibilidad por ausencia de vías de comunicación.

Dentro del análisis cuantitativo, se obtiene que el 40% de la población posee una accesibilidad buena hacia el conjunto de centros educativos con tiempos inferiores a los 65 minutos. Seguido de una accesibilidad media representada en otro 40% y finalmente, una accesibilidad baja con un 20% confirmando lo observado en la Figura 17.

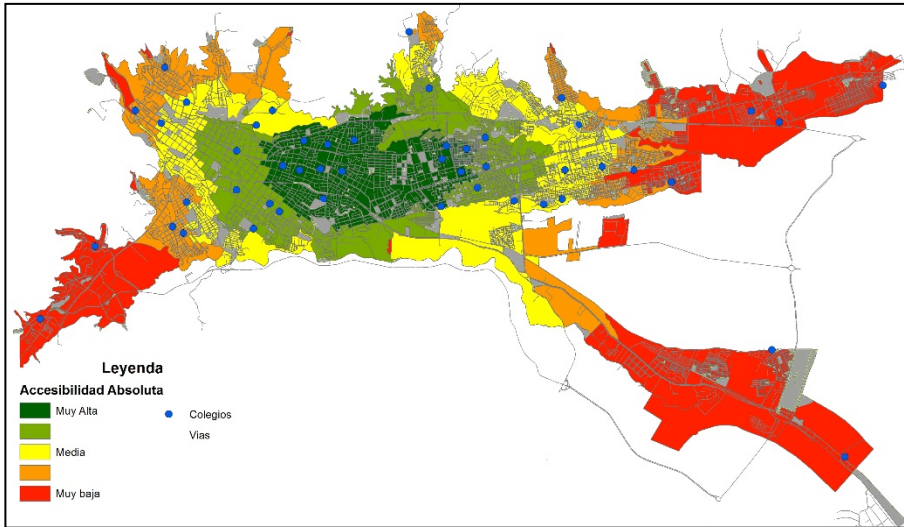


Figura 16. Indicador de Accesibilidad Absoluta peatonal hacia los centros educativos oficiales de Ibagué.

Accesibilidad absoluta por manzanas en minutos

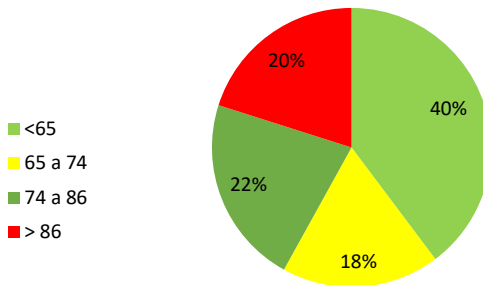


Figura 17. Diagrama por sectores del indicador de Accesibilidad Absoluta por minutos al conjunto de Centros Educativos Oficiales.

Demanda potencial a cada centro educativo oficial

Espacialmente, como se muestra en la Figura 18 la demanda potencial hacia la mayoría de centros educativos oficiales corresponde con zonas de alta densidad poblacional superando a los 2 300 habitantes por centro.



Figura 18. Población Potencial Cercana a cada Centro Educativo Oficial.

Cuantitativamente, se muestra en la Figura 19 que el 39.58% de los centros posee una demanda potencial menor a los 1 500 habitantes, seguido de un 22.65% con una demanda entre los 1 500 y 2 300 habitantes, finalmente se muestra que el 37.5% supera dicha cifra. En cuanto a la atención de la demanda por sectores, solo el 13% es apto para soportarla.

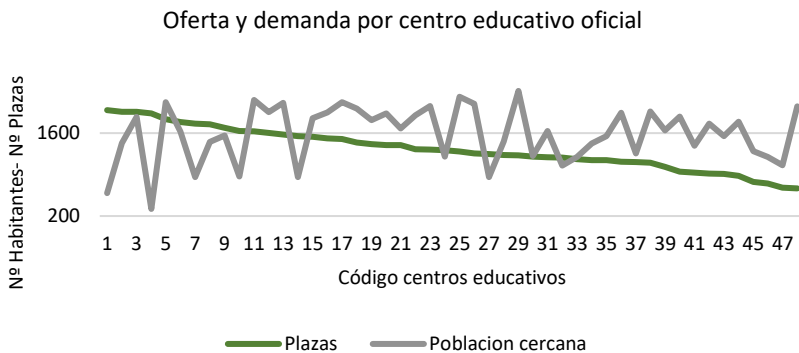


Figura 19. Diagrama de líneas que contrasta la oferta de cada centro educativo oficial respecto a la demanda cercana por sector.

Indicador de oportunidades acumuladas a 15 minutos

Espacialmente, la concentración de la demanda se sitúa sobre las comunas 3, 5, 8, 10 y 11, con cifras superiores a los 5 600 habitantes. Las zonas con menor concentración de demanda se localizan sobre la periferia en las comunas 7, 9 y 13 como se observa en la Figura 20.

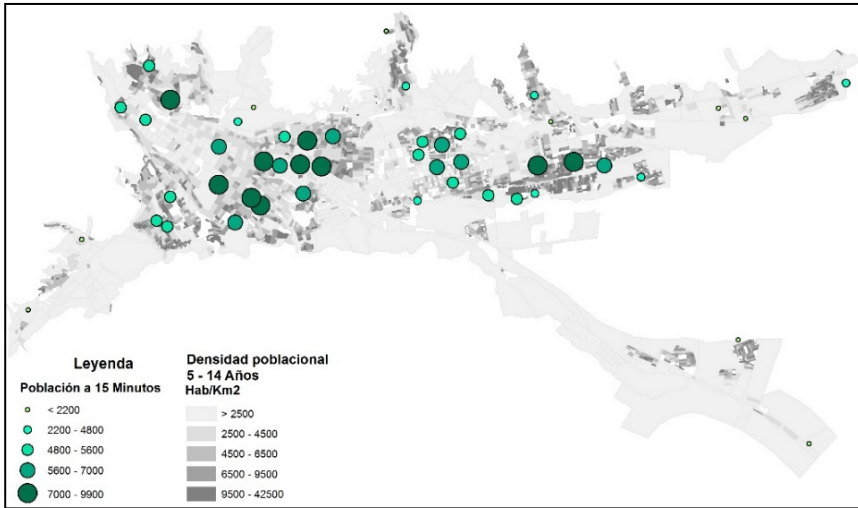


Figura 20. Mapa del indicador de Oportunidades Acumuladas: Población potencial a menos de 15 minutos de los Centros Educativos Oficiales en contraste con la densidad poblacional escolar.

Cuantitativamente y por medio de la Figura 21, el 39.58% de los colegios posee alta demanda superior a los 5 600 habitantes a 15 minutos de distancia. Seguido de un 18.75% entre los 4 800 a 5 600 habitantes, un 22.91% entre los 2 200 ha 4 800 habitantes y finalmente, un 18.75% con una demanda inferior a los 2 200 habitantes. De estas cifras, el 12.5% de los centros tienen capacidad de atención para la demanda aportada en este filtro de 15 minutos.

Conclusiones

La población en edad escolar entre los 5 a 14 años tiene una accesibilidad peatonal baja hacia los centros educativos oficiales y privados que ofrecen los niveles de educación básica primaria y secundaria en la ciudad de Ibagué. Los resultados muestran que existe un déficit de atención en un servicio de carácter obligatorio que el estado y las entidades internacionales vigilan y hace parte del cumplimiento de los derechos humanos como es la educación.

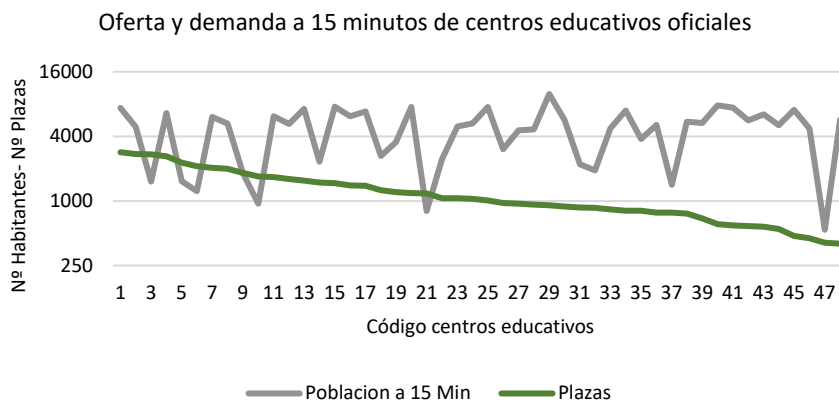


Figura 21. Diagrama de líneas con Demanda Potencial a 15 minutos de distancia hacia los Centros Educativos Oficiales.

En cuanto a la localización de los centros educativos, a nivel general corresponde en un 80% a la densidad poblacional escolar de la ciudad y a nivel oficial la cifra se reduce a un 60% aproximadamente. En la etapa de centros educativos generales, la concentración de los mismos se sitúa sobre el cuerpo principal de la ciudad, debilitando las comunas 7, 9 y 13 que corresponden a las alas periféricas. En la etapa de centros educativos oficiales, la concentración no solo afecta a dichas zonas, también se muestra poca presencia de centros sobre las comunas 1 y 4 localizadas al oriente y centro de la ciudad respectivamente. En ambas etapas, la ubicación de los centros se considera desequilibrada, puesto que no existe un patrón de concentración justificado que fortalezca la atención a la población por sectores.

Respecto al grado de accesibilidad espacial al servicio educativo tanto general como oficial, se afirma que es bueno. Hacia los centros educativos en general el 80.78% de la población escolar ibaguereña tiene un centro a menos de 6 minutos de distancia. En los centros educativos oficiales un 71% posee una cercanía con la población a menos de 10 minutos. Ambas situaciones se muestran sobre el cuerpo principal de la ciudad, a diferencia las zonas con accesibilidad baja que se posan sobre las comunas 7, 9 y 13 ubicadas en la periferia.

En resumen, a pesar de que la accesibilidad espacial sobre el territorio es buena, la atención a la demanda escolar no lo es. Por tanto, los costes en los desplazamientos peatonales aumentan y dificultan el acceso al servicio por la necesidad de emplear más tiempo y medios motorizados para tal fin. Es decir, que el problema va más allá de la ubicación geográfica de los centros involucrando la oferta y demanda por centro educativo.

Bibliografía

- Alcaldía de Ibagué (2015). “Ibagué cómo vamos”, Informe de calidad de vida - Ibagué 2015. Disponible en <<http://www.ibaguecomovamos.org/index.php/informe/informe-de-calidad-de-vida>>. Recuperado el 03 de mayo de 2017.
- Chica Olmo, J., Rodríguez López, C. and Chillón, P. (agosto, 2018). “Effect of distance from home to school and spatial dependence between homes on mode of commuting to school”, *Journal of Transport Geography*, no. 72, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.07.013
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s.f.). <<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>>. Recuperado el 16 de mayo de 2017.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2007). *Sistema de Consulta Información Censal*, Censo Básico 2005, disponible en: <http://systema59.dane.gov.co/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CG2005BASICO&MAIN=WebServerMain.inl>>. Recuperado el 03 de febrero de 2017.
- Departamento Nacional de Estadística (17 de diciembre de 2017). *Censo 2018 DANE*. Línea de tiempo: los censos en Colombia: <https://censo2018.dane.gov.co/index.php/linea-de-tiempo-los-censos-en-colombia>>. Recuperado el 28 de octubre de 2018.
- Fundación Open Street Map. (2017). <<https://www.openstreetmap.org/export#map=13/4.4253/-75.1860>>. Recuperado el 01 de febrero de 2017.
- Gallego, G., Labrador, R., Cabanillas, J. y Pintor, P. (2013). *Diseño de un modelo de asignación de viajes con aplicaciones SIG para la gestión de planes de movilidad urbana sostenibles en ciudades medias (13_1)*.
- Garrocho, C. y Campos, J. (2006). *Un indicador de accesibilidad a unidades de servicios clave para ciudades mexicanas: fundamentos, diseño y aplicación*, VI(22).
- Gutiérrez Gallego, J.A., Berrocal Nieto, R. y Ruiz Labrador, E.E. (2014). *Análisis de la Accesibilidad al Autobus Urbano de Mérida*, (64).
- Larsen, K.; Gilliland, J.; Hess, P.; Tucker, T.; Irwin, J. and He, M. (marzo de 2009). “The influence of the physical environment and sociodemographic characteristics on children's mode of travel to and from school”, *Revista Americana de Salud Pública*, 99(3). DOI: 10.2105 / AJP.2008.135319
- Loyola Gómez, C. y Albornoz del Valle, E. (2009). *Flujo, Movilidad y niveles de accesibilidad en el centro de Chillán año 2007*, 12(19).
- Mandic, S.; León de la Barra, S.B García Bengoechea, E.; Stevens, E.; Flaherty, C.; Moore, A. and Skidmore, P. (2015). “Personal, social and environmental

- correlates of active transport to school among adolescents in Otago, New Zealand”, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(4):432-437.
- Martínez Bascuñán, M. y Rojas Quezada, C. (2014). “Evaluación de la accesibilidad espacial a la red hospitalaria en el área metropolitana de Concepción”, *GeoFocus*, 2(13):176-200.
- Martínez Sánchez-Mateos, H.S. (2012). *La accesibilidad regional y el efecto territorial de las infraestructuras de transporte. Aplicación en Castilla-La Mancha*, (59).
- Ministerio de Educación Nacional (31 de mayo de 2010). *MINEDUCACION*. disponible en <<http://www.mineducacion.gov.co>>. Recuperado el 10 de mayo de 2017.
- Monzon de Caceres, A. (1988). “Los indicadores de accesibilidad y su papel decisor en las inversiones en infraestructuras de transporte. Aplicaciones en la comunidad de Madrid”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Disponible en <<http://oa.upm.es/736/>>. Recuperado el 12 de abril de 2017.
- Mora Aliseda, J., Nogales Galán, J., Gutierrez Gallego, J. y Cortés Ruíz, T. (2003). *Aplicación de técnicas de SIG en la planificación del transporte en Extremadura*, 38(75), España.
- Munoz-Raskin, R. (2010). “Walking accessibility to bus rapid transit: Does it affect property values? The case of Bogotá, Colombia”, *Transport Policy*, 17(2).
- NU-CEPAL-CELADE (noviembre, 2003). *Estudio sobre la distribución espacial de la población en Colombia*, CEPAL Ed. de Comisión Económica para América Latina y el Caribe, disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/7186/1/S0311812_es.pdf. Recuperado el 28 de octubre de 2018.
- Rossiter, K. (2013). *Safe Routes to School Plan 2013*. Recuperado el 28 de octubre de 2018, de City of Perham Minesota: https://www.ci.perham.mn.us/vertical/sites/%7B5BCEF176-6AD1-406C-A4C6-7F7D132DF5EB%7D/uploads/Perham_FINAL_PLAN.pdf
- UNESCO (2011). *La UNESCO y la Educación “toda persona tiene derecho a la educación”*, disponible en <<http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002127/212715s.pdf>>. Recuperado el 25 de mayo de 2017.
- Villanueva, A. (2010). “Accesibilidad Geográfica a los sistemas de salud y educación”. *Análisis espacial de las localidades de Necochea y Quequén* (2), pp.158-177.

Revista Cartográfica

Definición de la Revista

La *Revista Cartográfica* (RCA) del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) es una publicación semestral; incluye trabajos inéditos del estado del arte, revisión de la literatura científica, resultados de estudios e investigaciones sobre las actividades relacionadas con el campo general de la Cartografía, Geodesia y/o Información Geoespacial.

Sistema de arbitraje

La *Revista Cartográfica* cuenta con un grupo de evaluadores especialistas de notorio reconocimiento. El proceso de selección de cada artículo implica la valoración de dos o más expertos en el tema, sin identificación de la autoría, con el fin de garantizar un resultado exento de cualquier influencia. Después de la evaluación, los artículos se remiten al Comité Editorial quien lleva a cabo la selección de ellos para ser publicados.

Por otra parte, compete a la editora responder dudas y resolver cualquier situación que se suscite, así como la decisión final acerca del contenido de cada número de la *Revista Cartográfica*.

Instructivo para autores

Los lineamientos generales para presentar trabajos para su publicación, son los siguientes:

- Todo artículo sometido debe ser **original**, y no publicado, ni considerado para publicación en otra revista.
- La **extensión máxima** de los artículos debe ser de 25 páginas formadas y las llamadas de nota de 5 páginas.
- Los artículos podrán ser escritos en cualquiera de los cuatro idiomas oficiales del Instituto: **español, inglés, francés y portugués**. En el caso de artículos escritos en inglés, francés o portugués, evitar corte de palabras.
- El nombre de los autores, la institución a la que pertenecen, sus direcciones postal y electrónica se incluirán a pie de página al inicio del artículo.
- Cada artículo debe ser precedido por un **resumen** corto (máximo 350 palabras), el cual debe permitir al lector tener una idea de la importancia y campo que abarca el artículo, debe presentarse al menos en español e inglés.
- Inmediatamente después del resumen, se escribirán no más de seis **palabras clave** representativas del contenido general del artículo y características de la terminología usada dentro de un campo de estudio.
- Dentro del texto, si se trata de una cita textual que abarque como máximo dos líneas, se citará el autor, se transcribirá entre comillas y enseguida entre paréntesis se apuntará el año y número de página(s). Si la cita abarca más líneas, se transcribirá el párrafo o párrafos con una sangría, sin comillas tal como se indica en la plantilla.
- Las fotografías, figuras, gráficas, cuadros y tablas deberán ser presentadas listas para ser reproducidas y su colocación dentro del texto se indicará claramente.

- Los artículos deben ser colocados en la **plantilla** correspondiente la cual debe ser solicitada al editor responsable o al Departamento de Publicaciones en la Secretaría General.
- Se incluirá la **Bibliografía** consultada al final del artículo respetando el siguiente formato:
 Autores (apellidos, iniciales nombres.), (año entre paréntesis). “Título del artículo”, *Título de la revista*, vol. (núm.), Editorial, Ciudad, número de páginas (separadas por guión).
 Seemueller, W. y Drewes, H., (1998). “Annual Report of the RNAAC SIRGAS”, *IGS 1997 Technical Reports*, IGS CB, Pasadena, pp. 173-174.
 En el caso de tesis o libros colocar el número de páginas total al final de la referencia.
- Todos los autores deberán observar estos lineamientos.
- Los artículos deben enviarse a la Editora de la *Revista Cartográfica*, quien los someterá a dictamen anónimo de dos especialistas e informará el resultado a los autores en un plazo no mayor de un año:

María Ester Gonzalez
 Editora
 Universidad de Concepción
 Juan Antonio Coloma 0201, CP 4440000,
 Los Ángeles, Chile, Teléfono:+56 432405244
 Correos electrónicos: editor_revista_cartográfica | maria.ester.gonzalez@ipgh.org

No se devolverá el material enviado.

Función editorial del Instituto Panamericano de Geografía e Historia

El IPGH publica seis revistas, impresas y distribuidas desde México. Estas son: *Revista Cartográfica*, *Revista Geográfica*, *Revista Geofísica*, *Revista de Historia de América*, *Antropología Americana* y *Revista de Arqueología Americana*.

Se invita a todos los investigadores y profesionales de las áreas de interés del IPGH: cartografía, geografía, historia, geofísica y ciencias afines, a que presenten trabajos de investigación para que sean publicados en nuestras revistas periódicas.

Si requiere mayor información, favor de comunicarse a:

Departamento de Publicaciones
 Secretaría General del IPGH
 Ex-Arzobispado 29, Colonia Observatorio, 11860 Ciudad de México, México
 Tels.: (+52-55) 5277-5888 / 5515-1910
 Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org

Edición del
Instituto Panamericano de
Geografía e Historia realizada en su
Departamento de Publicaciones
Ex Arzobispado #29, Colonia Observatorio
11860, Ciudad de México, México.
Teléfono 5277-5791 5277-5888
publicaciones@ipgh.org
2019

ESTADOS MIEMBROS DEL INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

Argentina

EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN

Belice

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) fue fundado el 7 de febrero de 1928 por resolución aprobada en la Sexta Conferencia Internacional Americana que se llevó a efecto en La Habana, Cuba. En 1930, el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos construyó para el uso del IPGH, el edificio de la calle Ex Arzobispado 29, Tacubaya, en la Ciudad de México.

Bolivia

Brasil

Chile

En 1949, se firmó un convenio entre el Instituto y el Consejo de la Organización de los Estados Americanos y se constituyó en el primer organismo especializado de ella.

Colombia

Costa Rica

El Estatuto del IPGH cita en su artículo 1o. sus fines:

Ecuador

1) Fomentar, coordinar y difundir los estudios cartográficos, geofísicos, geográficos e históricos, y los relativos a las ciencias de interés para América.

El Salvador

2) Promover y realizar estudios, trabajos y capacitaciones en esas disciplinas.

Estados Unidos de América

3) Promover la cooperación entre los Institutos de sus disciplinas en América y con las organizaciones internacionales afines.

Guatemala

Haití

Solamente los Estados Americanos pueden ser miembros del IPGH. Existe también la categoría de Observador Permanente, actualmente se encuentran bajo esta condición: España, Francia, Israel y Jamaica.

Honduras

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

México

1) Asamblea General

Nicaragua

2) Consejo Directivo

3) Comisión de :

Panamá

Cartografía (Costa Rica)

Geografía (EUA)

Paraguay

Historia (México)

Geofísica (Ecuador)

Perú

4) Reunión de Autoridades

República Dominicana

5) Secretaría General (México, D.F., México)

Uruguay

Además, en cada Estado Miembros funciona una Sección Nacional cuyos componentes son nombrados por cada gobierno. Cuentan con su Presidente, Vicepresidente, Miembros Nacionales de Cartografía, Geografía, Historia y Geofísica.

Venezuela



Admissible relative errors of the parcel area of a land parcel map base created as a synthesis of individual survey maps *Andrea Barbieri y Carlos López-Vázquez* • Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba *Luciana Maria da Silva y Sílvio Rogério Correia de Freitas* • Automatic evaluation of geospatial data quality using web services *Emerson M. A. Xavier, Francisco J. Ariza-López y Manuel A. Ureña-Cámara* • Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del Ecuador utilizando tecnología LiDAR aerotransportada *Xavier Molina S., Mercedes Farjas A. y Juan Carlos Ojeda M.* • Experiencias cognitivas en la interpretación de un mapa de densidad de población para la región Pátzcuaro Zirahuén, Michoacán, México *Jesús Abraham Navarro Moreno* • Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo *Fernando Pavón, Daniel Andrade, Benjamin Bernard y Diana Contreras* • Comparison of maximum likelihood estimators and regression models for burn severity mapping in Mediterranean forests using Landsat TM and ETM+ data *Alexander Ariza, Javier Salas Rey y Silvia Merino de Miguel* • Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira *Eurico Lourenço Nicacio Junior* • Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas *Wendy Romero-Rojas, René Vázquez-Jiménez y Rocío N. Ramos-Bernal* • Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite *Carlos González-Luna, Anatoliy Filonov, Omar Mireles e Iryna Tereshchenko* • Análisis espacial de los cambios de usos del suelo. Aplicación con Sistemas de Información Geográfica *Luis Humacata* • Zonificación de las áreas propensas a incidentes por ataques de *Crocodylus acutus* en el Pacífico Central de Costa Rica utilizando un Sistema de Información Geográfica *Luis Fernando Sandoval Murillo, Carlos Morera Beña e Iván Sandoval Hernández* • Os mapas como operadores na gênese da cidade espreada. Desconstrução e semiose cartográfica na análise das plantas da cidade de São Paulo entre 1877 e 1930 *Eliane Kuvassney* • Accesibilidad peatonal a los servicios educativos de la ciudad de Ibagué- Tolima, Colombia *Mailen Stephany Alvarez Rojas, Elia Quirós Rosado y José Antonio Gutiérrez Gallego*

ISSN 0080-2085