



Zonificación de humedales en la planificación urbana. Estudio de caso: humedal Calabozo

Zonification of wetlands in urban planning. Case study: Calabozo wetland

Eduardo Andrés Torres Lara¹

Gianni José Leal Parra²

Fecha de recibido: 15 de febrero de 2021

Fecha de aceptado: 6 de febrero de 2022

Resumen

Este artículo trata sobre la incorporación de criterios de zonificación en el proceso de planificación urbana. Se utiliza un proceso de análisis espacial sobre imágenes satelitales para determinar la situación en la que se encuentra el sector del humedal Calabozo en Chile. Además, se trabajó con un set de fotografías aéreas digitales del sector de Calabozo desde el año 2006 al 2017. Para los efectos de delimitar la zona de humedales del sector Calabozo se calcularon los índices NDVI y MNDWI, dada su intención de convertirlo en Área Verde Interurbana (AVI) por parte de la Municipalidad de Coronel. Se espera que esta metodología incida en la formulación de las zonificaciones que establecen los instrumentos de planificación territorial, aportando criterios ambientales bajo un análisis detallado e interdisciplinario de la situación hídrica de la zona de humedal.

Palabras clave: humedal, planificación urbana, área metropolitana de Concepción.

¹ Municipalidad de Coronel, Chile, correo electrónico: etorreslarazo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-154X>

² Forestal Arauco, Chile, correo electrónico: galealparra@gmail.com

Abstract

This article is about the incorporation of zonification criteria on the urban planification process. An spatial analysis process is used on satellite images to determine the situation of Calabozo wetland sector. Although, it was worked with a set of areal digital photographs of the Calabozo sector from 2006 to 2017. For delimitation effects of the zone of the wetland sector of Calabozo due to the intentions of turn it up into an interurban green area for the city hall of Coronel, the procedure was to calculate the index of normalized difference of vegetation and the index of normalized modification of water difference. It is hoped that this methodology takes part on the formulation of territorial planification, giving environmental criteria under a detailed analysis of hydric situation of the wetland zone.

Key words: wetland, urban planification, metropolitan area of Concepción.

Introducción

Las ciudades chilenas experimentan un fuerte crecimiento, algunas en altura otras en extensión. Sea cual fuese el caso, en Chile el 87,8% de su población reside en ciudades (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2018). Esta población se concentra en conurbaciones donde destacan el Área Metropolitana de Santiago, el Gran Valparaíso y el Área Metropolitana de Concepción (AMC), siendo este último territorio de interés para esta investigación.

El AMC concentra dos tercios de la población total de la región del Biobío, lo cual se traduce en una fuerte presión de sus suelos para la satisfacción de la demanda habitacional. En esta área metropolitana las comunas que más han consumido suelo urbano son San Pedro de la Paz y Coronel. Este crecimiento se refleja en la ocupación de grandes extensiones de terreno en la periferia urbana, situación descrita teóricamente por Barton (2006, p. 29).

Esta expansión urbana es regulada por las normas contenidas en los planes reguladores comunales y por el plan regulador metropolitano, siendo estos los instrumentos normativos que establecen una división por zonas del territorio asignando los usos permitidos y las normas básicas de urbanización. Jaque Castillo y otros (2017, p. 109) desarrollaron un extenso diagnóstico de estos instrumentos de planificación, concluyendo que, para lograr un desarrollo sustentable, se deben considerar todas las variables que intervienen en el territorio.

Esta acelerada expansión que experimentan las comunas del AMC se concentra en las áreas de alto valor natural, las que están siendo fuertemente

presionadas a destinar su uso como residencial, industrial o mixto, en donde una pequeña alteración en este frágil ecosistema termina por producir alteraciones significativas en el medio ambiente local. Es así que, una forma de controlar los impactos del crecimiento urbano en sectores de fragilidad ambiental como los humedales, es estableciendo normas urbanas que restrinjan los usos de estos terrenos. Estas zonificaciones deben estar respaldadas por argumentos, técnicas y evidencias basadas en métodos científicos, replicables y verificables.

Objetivo del estudio

El objetivo es definir una propuesta óptima de zonificación urbana para el sector Calabozo de la ciudad de Coronel, considerado de una alta fragilidad ambiental al ser una zona de recepción y acumulación hídrica, formando parte esencial de la red de esteros que atraviesan la zona urbana de la comuna. Este sistema hídrico no ha sido reconocido en el proceso de modificación del Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC) el cual deja sin protección, en lo que respecta a la normativa urbana, a esta importante zona.

Contexto territorial

La comuna de Coronel es parte del Área Metropolitana del Gran Concepción, conurbación que alberga a 970.973 habitantes (INE, 2018) de los cuales la comuna presenta un 12.56% del total. En el último periodo la comuna ha experimentado un aumento de población intercensal de 20 mil habitantes. La ciudad presenta una extensa superficie disponible para la urbanización, la cual se localiza en el sector nororiente dentro del límite urbano. Esta superficie se compone de praderas y humedales de las cuales 230 hectáreas están normadas por el Plan Regulador Comunal. El sector correspondiente a humedales es el localizado en el sector de Calabozo y su superficie se estima en 300 hectáreas (Figura 1), las cuales están catalogadas como área de extensión urbana y son normadas por el Plan Regulador intercomunal.

En esta zona de humedales, según el Plan Maestro de Aguas Lluvias, confluyen una vasta red de quebradas y esteros provenientes de tres subcuencas definidas en el mismo informe. Es justamente en el sector denominado Calabozo donde se localiza del más extenso e importante humedal. De esta zona de acumulación hídrica se da origen al estero Villa Mora, el cual es parte fundamental del humedal Boca Maule.

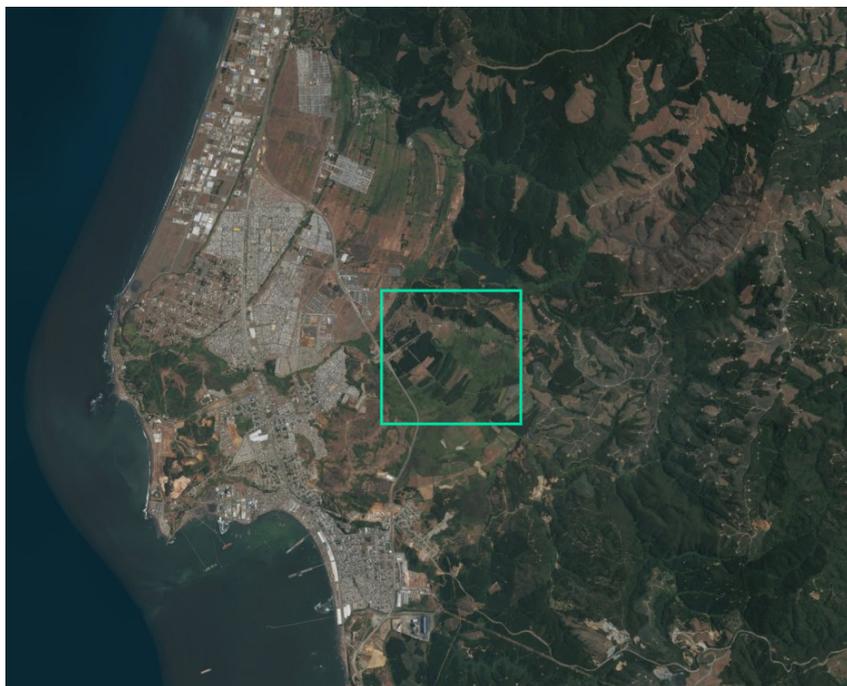


Figura 1. Localización Humedal Calabozo, comuna de Coronel.

Fuente: elaboración propia, adaptado de Esri Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS.

Análisis de la problemática local

En la comuna de Coronel, específicamente en el sector poniente de la comuna, existe un complejo sistema hídrico asociado a una red de esteros, quebradas, lagunas y humedales ubicados en la planicie litoral que se extiende desde la comuna de San Pedro de la Paz hasta la comuna de estudio. Este sistema aporta con una multiplicidad de servicios ecosistémicos relevantes al territorio urbano, tales como diversidad paisajística, recreación, biodiversidad, estabilización climática, control de inundaciones, recarga de aguas subterráneas, reserva de agua dulce, entre otros.

No obstante aquello, la propuesta de modificación del PRMC no reconoce los humedales y quebradas localizadas tanto en el sector de Calabozo (Zona ZEU-4₍₂₎) como en las cuencas hídricas asociadas a Calabozo y Estero El Manco (Zona ZEU-3(14)), siendo el primer caso el área donde se desarrolló el presente estudio.

Dadas las condiciones descritas, el sector Calabozo presenta riesgos naturales asociados a anegamientos e inundaciones. La presencia del

nivel freático se encuentra casi a nivel superficial conformando suelos de rápida saturación; es aquí donde la presión inmobiliaria, ya sea formal o de asentamientos informales, se conjugan para generar condiciones de riesgos para la población, para lo cual se requiere precisar una zonificación que restrinja su uso para destinos urbanos que constituyan incompatibilidad.

Aspectos metodológicos

Con el objeto de determinar la situación en la que se encuentra el sector del humedal Calabozo se realizó un proceso de análisis espacial sobre imágenes satelitales. Por una parte, se utilizaron imágenes de la misión Sentinel 2A de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) lanzada el 23 junio de 2015. Por otra parte, se utilizaron imágenes del programa Landsat de las agencias NASA/USGS. De este último programa sus satélites corresponden a una misión iniciada en el año 1972 hasta nuestros días y que van desde los satélites Landsat 1 al 8 (en la misión 6 hubo un problema con su puesta en órbita) (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio [NASA], 2017). Lo primeros tres corresponden a sistemas de radar. Ya desde el Landsat 4 en adelante las misiones transportaron sensores ópticos (MSS, TM, ETM+, OLI/TIRS) con resoluciones que van desde los 30 metros en el espectro visible y 15 metros en pancromático para Landsat 8 (Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS], 2017). Cabe destacar que, si bien la misión Sentinel posee una mejora en la resolución espacial (15 metros), Landsat posee una mejor resolución temporal que la hace indispensable en cualquier análisis de series de tiempo (NASA, 2017).

Materiales

La adquisición de las imágenes Sentinel se realizaron desde el sitio web Copernicus Open Acces Hub de la ESA y las imágenes Landsat desde el sitio web Earth Explorer de la USGS. En ambos casos, se seleccionaron las imágenes con la menor cobertura de nubes posible entre los años 2015-2017/mediados de verano para Sentinel y 2013-2017/mediados de verano para Landsat 8.

Finalmente, se utilizó también un modelo digital de elevación del Advanced Lands Observation Satellite (ALOS PALSAR), satélite japonés de la JAXA y que posee una resolución de 12,5 metros. Todos estos productos fueron procesados aplicándoles correcciones radiométricas (DN a radiancia) y geométricas (Chuvieco, 2010) tomando puntos de control basados en cartografías de la Municipalidad de Coronel.

Además, se trabajó con un set de fotografías aéreas digitales del sector de Calabozo, propiedad de la Municipalidad de Coronel, para los años 2006, 2010, 2012, 2014 y 2017. Si bien estas fotografías no se encontraban

ortorrectificadas ni georreferenciadas al momento de su uso, su resolución temporal permitió realizar análisis visual para referencia, comparación y detección de posibles cambios de cobertura que se pudiesen encontrar en el lugar, no observables por teledetección. Para los efectos de delimitar la zona de humedales del sector Calabozo dada su intención de convertirlo en Área Verde Interurbana (AVI), se procedió al cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI, por sus siglas en inglés).

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales la vegetación, siendo uno de ellos la aplicación de índices vegetativos relacionados con el verdor (Chuvieco, 1998, como se citó en Meneses-Tobar, 2011; Toker *et al.*, 2001). El NDVI fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse *et al.*, 1974). Con este índice se busca determinar la vigorosidad de la planta. Utilizando radiancias o reflectancias de un canal rojo de alrededor de 0,66 μm y un canal cercano a IR de alrededor de 0,86 μm (bandas 4 y 5 para Landsat 8, respectivamente y bandas 4 y 8 para Sentinel 2A, respectivamente). Los dos canales detectan profundidades muy diferentes a través de los doseles de vegetación (Gao, 1996). Los valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor serán mejores (Muñoz, 2013; Díaz, 2015). Por otra parte, en estudios anteriores de sensores remotos térmicos, se ha puesto mucho énfasis en utilizar el NDVI como el principal indicador del clima urbano (Yuan y Bauer, 2007) ya que la actividad humana (urbanización y prácticas agrícolas) desempeñan un papel importante en la influencia de las tendencias del NDVI en algunas regiones; la urbanización provoca la disminución de cobertura vegetal por su proceso de expansión, mientras que la irrigación y la fertilización pueden contribuir al aumento de estas coberturas verdes (Piao *et al.*, 2003).

La ecuación para el NDVI en Landsat 8 es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR-Rojo}) / (\text{NIR}+\text{Rojo}), \text{ siendo NIR} = \text{banda 5 (30 m)} \text{ y Rojo} = 4 \text{ (30 m)}$$

La ecuación para el NDVI en Sentinel 2A es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR-Rojo}) / (\text{NIR}+\text{Rojo}), \text{ siendo NIR} = \text{banda 8 (10 m)} \text{ y Rojo} = \text{banda 4 (10 m)}$$

Se presenta en la Figura 2 el NDVI para imagen Landsat 8 con fecha 2017, mediados de verano:



Figura 2. NDVI Landsat 8 y situación de zonificación propuestas por el PRMC. Sector Calabozo.

Fuente: elaboración propia.

El método del índice de agua de diferencia normalizada o NDWI (McFeeters, 1996, como se citó en Wang *et al.*, 2013), es eficaz para extraer información sobre el agua, pero con el problema de que una parte de la información se relaciona con valores de elementos antrópicos (como edificios y caminos) mezclándose con los de cuerpos de agua extraída de la ciudad, provocando errores de comisión, aunque en la detección de vegetales acuáticos continúa siendo un buen indicador (Gao, 1996). Ante esto, Xu introdujo el método del índice de agua con diferencia normalizada modificado o MNDWI (Xu, 2005, como se citó en Wang *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2015) que podría disminuir la confusión entre el agua y la construcción, pero difícil distinguiendo entre la sombra de la montaña y el cuerpo de agua (Wang *et al.*, 2013). El valor de MNDWI también varía de -1 a $+1$. La mayor reflectancia de la acumulación y la menor reflexión del agua en la banda SWIR da como resultado valores negativos de la acumulación y valores positivos de las características del agua en la imagen derivada de MNDWI (Singh *et al.*, 2015; Gautam *et al.*, 2015). Debido a la situación que se presenta en función del PRMC, este índice representa una pieza importante de visualizar dadas las características hídricas del sector Calabozo ya que la extracción de cuerpos de agua, o el relleno de su territorio fluvial (García, 2015), es una parte importante de la gestión de los recursos hídricos y ha sido el tema de varios trabajos de investigación relacionados con la teledetección durante más de dos décadas (Kaplan y Avdan, 2017). Por otra parte, está claro que el contenido de agua en el suelo es un parámetro inicial importante para los modelos regionales de

disponibilidad hídrica, ya que la predicción correcta de sus flujos y posterior gestión, depende fundamentalmente del conocimiento de este parámetro de superficie terrestre. Sin embargo, también es evidente que el contenido de agua en la superficie del suelo presenta una gran falta de homogeneidad que merece una especificación espacial y temporal (Gillies *et al.*, 1997) siendo entonces el MNDWI un buen indicador para observar esta variabilidad en el sector. Cabe destacar también que, en trabajos previos, la relación NDVI / temperatura también se ha utilizado para derivar o evaluar dos variables: cobertura de vegetación fraccionada y contenido de agua en la superficie del suelo para el modelado climático (Van de Griend y Owe, 1993; Carlson *et al.*, 1995; Gillies y Carlson, 1995; Gillies *et al.*, 1997; Goward *et al.*, 2002 como se citó en Yuan y Bauer, 2007). En efecto, ambos índices, NDVI y MNDWI, fueron utilizados para un correcto conocimiento y mejor aproximación a la comprensión de las dinámicas hídricas y vegetacionales del sector Calabozo y reconocer su importancia para la comuna.

La ecuación para el MNDWI en Landsat 8 es la siguiente:

$MNDWI = (Verde - SWIR) / (Verde + SWIR)$, siendo Verde = banda 3 (30 m) y SWIR = banda 6 (30 m)

La ecuación para el MNDWI en Sentinel 2A es la siguiente:

$MNDWI = (Verde - RED) / (Verde + RED)$, siendo Verde = banda 11 (20 m) y SWIR = banda 3 (10 m)

Para la banda 11 de Sentinel (20 m), se le aplicó el método de *resampling* mediante interpolación bilineal. El peso asociado a cada nivel digital es proporcional a la proximidad entre ellos, medida entre centros de celdas (Chuvieco, 2010). Así, los valores de los píxeles de la banda 11 pasaron de 20 metros a 10 metros, optimizando el cálculo del MNDWI con la banda 3 de 10 metros del mismo satélite.

Resultados

De los valores NDSI de Landsat 8 se aprecia que, para el mes de enero, el menor valor detectado corresponde a -0,127 que representaría suelos desnudos, con un valor máximo de 0,592 que va a representar la máxima vigorosidad. Esto indica que, para esa fecha, la vegetación se mantiene mayormente de buena calidad destacándose los valores mayores a cero. En efecto, puede inferirse que el reservorio de agua almacenado de lluvias posteriores a la fecha, influyen en la mantención de las condiciones físico-naturales que incidirán directamente en la vegetación y la formación de humedales (Correa-Araneda *et al.*, 2011).

De los valores NDSI de Sentinel se aprecia que el menor valor detectado corresponde a -0,998 y el máximo valor corresponde a 0,998. Aquí debe destacarse que el mínimo valor, casi -1, indica la formación de cuerpos de agua en diferentes sectores de la planicie litoral. Por otra parte, siendo los valores mayores a 0, señalan una muy buena calidad de la vegetación o alta vigorosidad, con valores casi 1. Para evitar errores de comisión, se generó una máscara sobre vías de tránsito vehicular localizados en el sector este del centro urbano de Coronel.

De esto puede inferirse que, durante el periodo de verano, cuando las precipitaciones tienden a la disminución, la vegetación para el sector de Calabozo se mantienen con una buena vigorosidad gracias a las reservas de los aportes hídricos de las cuencas aledañas, permitiendo una constante hidratación de estas y, en efecto, siendo compatible con proyecciones de área verde en la escala intercomunal en cuanto a la presencia de dicha cobertura. Valores entre 0 y -1 indican poca vegetación debido a intervenciones en distintos niveles de antropización, como caminos y rellenos, a los que este sector puede verse influenciado (Peña-Cortés *et al.*, 2006) pero así también formación de cuerpos de agua y vegetación hidrófila, elementos propios de los humedales (Figuroa *et al.*, 2009; Correa-Araneda *et al.*, 2011). Se puede entender entonces la importancia de conservar los atributos naturales de este sector, dado los servicios ecosistémicos que ofrece (Peña-Cortés *et al.*, 2006; García, 2015), aunque principalmente por su condición de reservorio y controlador hidrológico de los aportes pluviales provenientes de las cuencas aledañas. De los valores del MNDWI, se estimó oportuno trabajar con las imágenes Sentinel, puesto que este satélite permite con mayor exactitud la visualización de los cuerpos de agua dada la buena resolución radiométrica que ofrece.

En consecuencia, áreas más oscuras (Figura 3) indicarán presencia de cuerpos de agua en donde se alcanza un valor mínimo de 0.25 y valor máximo de 0.98. Áreas más claras, representarán suelos desnudos, rellenos o vegetación. Es importante señalar lo fundamental en la verificación de los resultados con campañas en terreno y comparaciones con el set fotográfico, debido a distorsiones que provocan los sitios urbanos al reflejar una longitud de onda similar a las de cuerpo de agua, como por ejemplo, un alarga línea azul correspondiente a la vía vehicular ByPass (sector este de la zona urbana) que atraviesa de norte a sur la comuna y que fue corregido mediante una máscara para evitar comisión de dichos píxeles.

Para complementar y validar la información descrita anteriormente en cuanto a distribución de cuerpos de agua superficiales en los planos bajos del área analizada mediante el MNDWI, se generaron las redes hídricas que fluyen en este sector mediante el uso del módulo Hydrology de ArcGIS utilizando para

ello la imagen ALOS PALSAR y así observar el grado de conexión entre las zonas con presencia de agua y las redes generadas.

En síntesis, se observa que los cuerpos de agua tienen bastante relación en cuanto a cómo se enlazan a las redes fluviales calculadas, lo cual señala que la alimentación hídrica del sector es mucho más compleja que la delimitación planteada en el Proyecto de PRMC a través de la Zona ZPEI. Resulta necesario entonces ampliar esta zonificación a una superficie mayor, para los efectos de proyección bajo alguna normativa compatible, como lo es la figura de Área Verde Intercomunal.

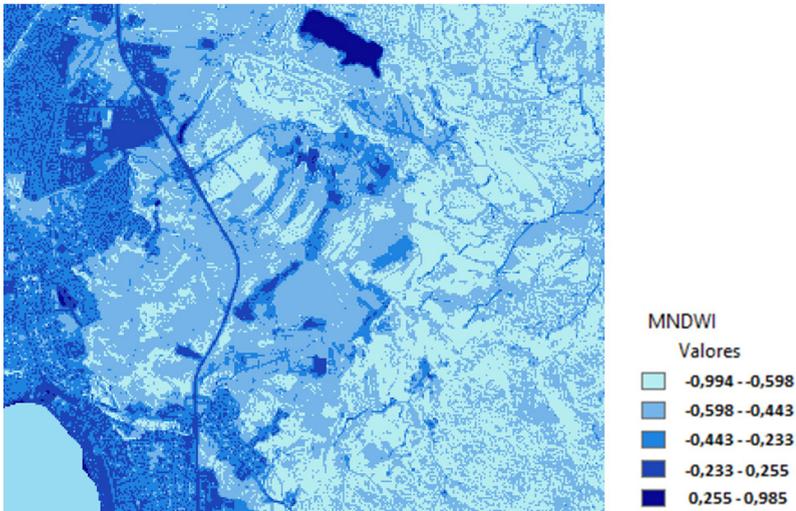


Figura 3. MNDWI para el sector de Calabozo.
Fuente: elaboración propia.

Es por ello que una zonificación adecuada para la zona plana de Calabozo deberá responder a la complejidad hídrica que presenta la zona, considerando el área de influencia de saturación hídrica superficial, su extensión y las variabilidades que el humedal posee como sistema. En efecto, los criterios de zonificación se basaron en dos características fundamentales de estos sistemas: a) hidro-período (Flores-Verdugo *et al.*, 2007) que equivale a las temporadas de circulación de caudales y b) suelo hídrico (Hernández, 2010; Cubero Fernández, 2017) que es la capacidad de retención y niveles de agua de saturación en el suelo. Esto influye principalmente en cómo los diferentes canales, sectores húmedos o saturados, con la consiguiente vegetación que precede a estas condiciones, van variando espacialmente en el tiempo, por

cuanto una zonificación única pareciese errada e insuficiente. Por lo anterior, se analizan distintas zonas buffer tentativas (30 m, 50 m, 100 m y 350 m) en base a las redes fluviales que se conectan con los cuerpos de agua, para así darle un mejor ajuste a las proyecciones en el sector (Figura 4).

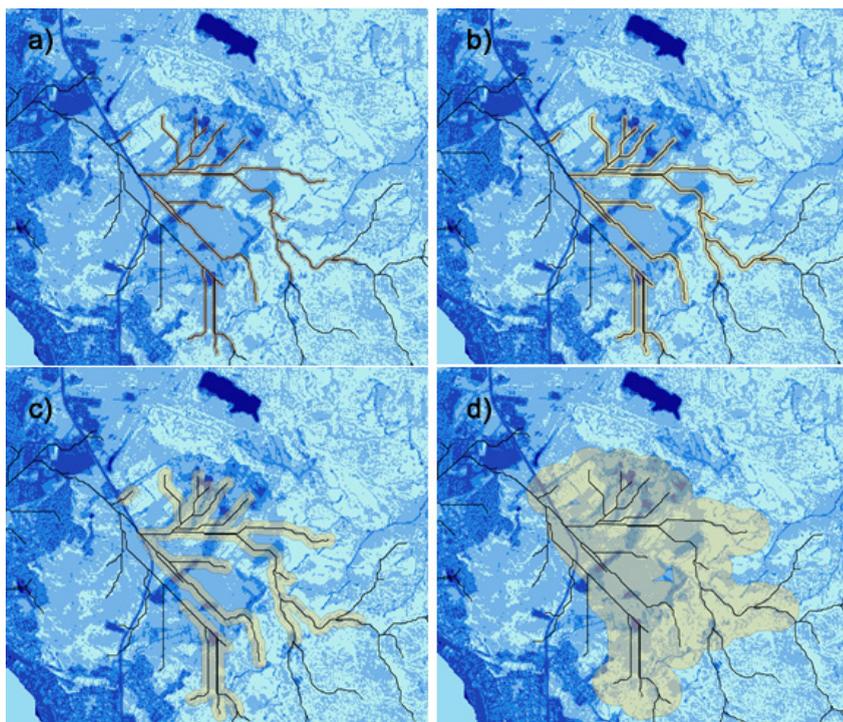


Figura 4. Zonas buffers en redes fluviales: a) Buffer 30 metros; b) Buffer 50 metros; c) Buffer 100 metros; d) Buffers 350 metros. Sector Calabozo.

Fuente: elaboración propia.

En definitiva, observando las áreas de influencia, los buffers de 30 m, 50 m y 100 m parecen ser insuficientes en su extensión (la zonificación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, MINVU, reduce el humedal a sólo dos canales con buffers de 50 m). De acuerdo a este análisis, la zonificación de 350 m parece ser la más óptima para adecuarse a las variabilidades de hidro-período y suelo hídrico, permitiendo así la conservación de las funciones hídricas y vegetacionales del humedal, compatible con las características físico-naturales de su territorio fluvial (García, 2015).

Es así entonces como se logran identificar ciertos patrones espaciales en función de la información proporcionada por cada índice; esto es, sectores

con tendencia a la saturación de agua debido a la influencia de los afluentes cercanos y al consiguiente afloramiento de los niveles freáticos por saturación de suelo. La humedad, por tanto, influye en el crecimiento y vigorosidad de la vegetación inclusive en temporadas secas, cuyas reservas permitirán la contribución constante de aportes de agua, lo que se expresa en todos los efectos naturales propios de un humedal.

En función de las zonificaciones mostradas anteriormente, se ha realizado una superposición de estas coberturas generadas para así lograr generar un polígono que adjunte en mayor medida los valores recopilados.

Finalmente, para los efectos de determinar la mancha más representativa para el humedal de Calabozo en términos de una zonificación urbana, se consideró variables de topografía, patrones de acumulación de agua, vegetación, así como futuros proyectos viales proyectados (Ruta Pie de Monte) y la existencia de humedales al interior del límite urbano establecido por el Plan Regulador Comunal de Coronel vigente, determinando de esa forma el polígono óptimo para zonificar el Humedal Calabozo a esta escala de planificación (1:100.000) como Área Verde Intercomunal, conforme a lo estipulado en el artículo 2.1.31. de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

Para complementar la propuesta de Zona de Área Verde Intercomunal (AVI) para el Humedal Calabozo y tomando como base la consideración obligada de los cauces aportantes de dicho ecosistema (García, 2015), se ha considerado pertinente elaborar una propuesta de zonificación que estableciera mayores niveles de restricción a dichos afluentes (Zonas AVI y ZPEI) para así lograr mantener en óptimas condiciones el sistema natural analizado. De esta manera, trabajando con las redes fluviales antes generadas, se realizó una jerarquización basada en el método de Stralher el cual señala el orden de corrientes considerando los aportes que se circunscriben a un cauce principal.

La justificación de este procedimiento reside en que, en virtud de detectar zonas con capacidad de urbanización, es necesario definir y conservar canales fluviales que sean capaces de evacuar todas las aguas que provengan de afluentes cercanos para así, en episodios de lluvia intensas, existan mecanismos que eviten riesgos naturales asociados a licuefacción, desprendimientos de ladera por saturación en pendiente, entre otros (García, 2016). Por otra parte, el objetivo de proteger dichos cauces permitirá que el humedal conserve sus características naturales debido al aprovisionamiento constante y buena calidad de aguas de sectores más elevados.

De este modo, siguiendo los criterios de zonas AVI y ZPEI propuestos por MINVU en proyecto de Modificación del PRMC para otras zonas de la intercomuna, se generaron similares identidades considerando buffer de 100

metros (ZPEI), en donde para el orden de Stralher queda representado en la Figura 5.

De esta forma, se define para esta zona ZPEI de la Cuenca N° 7 (Plan Maestro de Drenaje y Evacuación de Aguas Lluvias de Lota y Coronel, MOP) una propuesta de Áreas Verdes Intercomunal ajustada a condiciones topográficas con el cumplimiento mínimo de protección.

El detalle de la Zonificación propuesta corresponde a AVI humedal Calabozo: 3,45 km², AVI Calabozo orden de Stralher: 5,08 km² y ZPEI Calabozo orden de Stralher: 2,41 km².

Por consiguiente, se realizó la superposición de la propuesta de Zonificación MINVU de las zonas ZEU-4 y ZPEI del Proyecto de Modificación PRMC sobre una composición en color verdadero Sentinel, constatando la incompatibilidad de la propuesta ofrecida por el MINVU con las características ofrecidas en el trabajo.

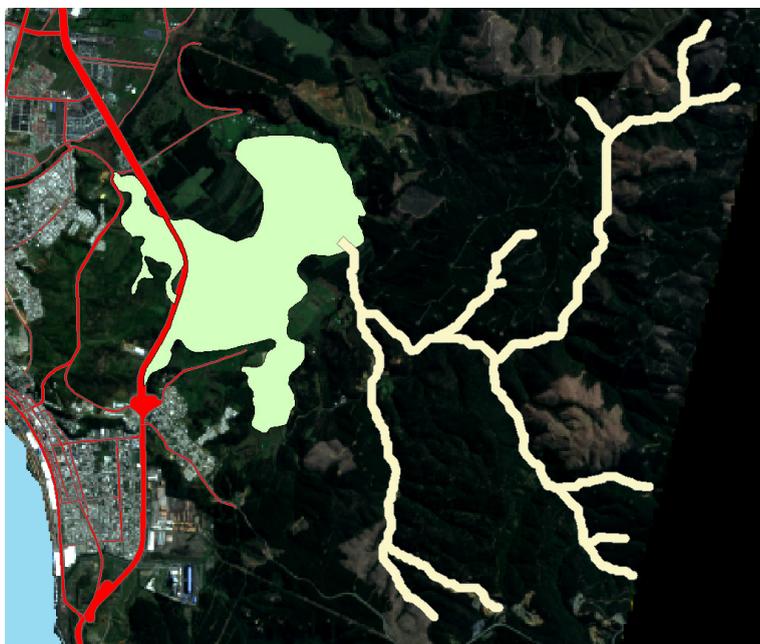


Figura 5. Zona ZPEI propuesta. Polígonos de color rojo indican vialidad vehicular de la comuna.
Fuente: elaboración propia.

Continuando el ejercicio, se adjuntó una de las zonas ZPEI del PRMC localizadas en el plano bajo, debido a que conecta funcionalmente los cauces provenientes del macizo cordillerano con el resto del sistema hídrico comunal.

En tanto, la segunda zona, localizada más al sur, se ha descartado del análisis debido a que responde principalmente a una morfología antropizada (canales de regadío) y, en otro tanto, es absorbida por la zona AVI propuesta para el área del Humedal.

Para efectos prácticos, se realizó la unión de este ZPEI (MINVU) con el ZPEI generado en base al orden de Stralher, resultando un polígono único ZPEI para este sector. Por lo tanto, la zonificación final propuesta para el sector de Calabozo, tanto en la Planicie Litoral como en el macizo cordillerano es lo que presenta la Figura 6.



Figura 6. Propuesta de Zonas ZPEI y AVI.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los humedales son sistemas complejos de una alta fragilidad ambiental, los cuales requieren de una protección normativa para su preservación ecológica. Actualmente existen diversas metodologías que buscan establecer los límites de un humedal. En esta investigación mediante un caso práctico se ejecuta una metodología basada en técnicas de teledetección con imágenes satelitales de distribución gratuita, para el análisis de aspectos hídricos y

morfológicos con el fin de establecer una zonificación y sus respectivos usos de suelo para la protección del humedal calabozo. Los resultados muestran un claro dominio entre la cobertura vegetal y cuerpos de agua en las áreas de estudio. Posteriormente, dicha información fue tratada para verificar zonas que cumplieran con la categoría de AVI dadas sus características naturales. Lo trascendental es que esta u otras metodologías se apliquen al proceso de planificación urbana y sean parte fundamental de los criterios que rigen la zonificación de nuestro territorio, sobre todo de las zonas urbanas. Los resultados obtenidos permiten incorporar criterios ambientales al proceso de zonificación territorial, criterios que son la base para determinar los usos de suelo permitidos en estos ecosistemas de alta fragilidad ambiental. Para el caso del humedal se lograron definir zonas de protección, esencialmente las zonas de escorrentía hídrica superficial y zonas de amortiguamiento en donde se permitirían los usos destinados a parques, áreas verdes y equipamiento asociado a estas.

Bibliografía

- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2017). *Landsat Media Resource*. https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/news/index.html
- Agencia Espacial Europea (2017). *Sentinel 2*. https://www.esa.int/es/ESA_in_your_country/Spain/SENTINEL2
- Barton, J. R. (2006). Sustentabilidad urbana como planificación estratégica. *EURE*, 32 (96), 27-45. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612006000200003>.
- Carlson, T. N., Capehart, W. J. and Gillies, R. R. (1995). A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote sensing of Environment*, 54(2), 161-167.
- Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, (10), 1-9.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental. *La Observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel Ciencia.
- Correa-Araneda, F., Urrutia, J. y Figueroa, R. (2011). Estado del conocimiento y principales amenazas de los humedales boscosos de agua dulce de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84 (3), 325-340.
- Cubero Fernández, D. (2017). *Guía práctica para la caracterización y delimitación de suelos hidromórficos asociados a los ecosistemas de humedal*. Sistema Nacional de Conservación (SINAC), Costa Rica.
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. [Máster en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad Complutense de Madrid]. https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

- Figueroa, R., Suárez, M., Andreu, A., Ruiz, V. H. y Vidal-Abarca, M. R. (2009). Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile Central. *Gayana* (Concepción), 1 (73), 76-94.
- Flores-Verdugo, F., Moreno-Casasola, P., Agraz-Hernández, C., López-Rosas, H., Benítez-Pardo, D. y Travieso-Bello, A. (2007). La topografía y el hidroperíodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (80), 33-47.
- Gao, B. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 3 (3), 257-266.
- García, J. H. (2015). Reflexiones y enfoques en la conservación y restauración de ríos: georestauración y pensamiento fluvial. Biblio 3W. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*. XX, (1), 142.
- García, J. H. (2016). Riesgos naturales y Territorio. *Una perspectiva didáctica desde la Geografía*, Universidad de Concepción.
- Gautam, V. K., Kumar G. P., Murugan, P. y Annadurai, M. (2015). Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia*, 4, 739-746.
- Gillies, R. R., Kustas, W. P. y Humes, K. S. (1997). A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (15), 3145-3166.
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoam*, 28 (2), 139-147.
- INE (2018). *Síntesis de resultados, Censo 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas - Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
- Jaque Castillo, E. C., Lara San Martín, A. y Merino González, C. (2017). Fortaleciendo el uso de los instrumentos de planificación urbana, para la gestión de riesgos. Ciudad de Coronel, Región del Biobío. *Revista INVI*, 32 (90), 107-124. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582017000200107>
- Kaplan, G., Avdan, U. (2017). Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50, 137-143.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of the open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432.
- Meneses-Tobar, C. (2011). *El índice normalizado diferencial de la vegetación. Medir la Degradación del Bosque*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Roma.
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%2C%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Peña-Cortés, F., Gutiérrez, P., Rebolledo, G., Escalao, M., Hauenstein, E., Bertrán, C., Schlatter, R. y Tapia, J. (2006). Determinación del nivel de antropización de humedales como criterio para la planificación ecológica de la cuenca del lago Budi, IX Región de La Araucanía. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 75-91.
- Piao, Shilong, Jingyun Fang, Liming Zhou, Qinghua Guo, M. Henderson, Wei Ji, Yan Li and Shu Tao (2003). Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, Res., 108 (D14), 4401.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W. and Sehell, J. A., (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. *Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center. Texas A. & M Univ.: College Station*.
- Singh, V. K., Setia, R., Sahoo, S., Prasad, A. and Pateriya, B. (2015). Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, Vol. 30, No. 6, p. 650–661.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliso, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J. y Dempere, L. (2000). En Sobrino, J. A. (Ed.), *Teledetección*, Servicio de Publicaciones: Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8).
- Tucker, C., Slayback, D., Pinzon, J., Los, S., Myneni, R. and Taylor, M. (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45, (4), 184-190.
- USGS (2017). <https://www.usgs.gov/>
- Van de Griend, A. A. and Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 4 (6), 1119-1131.
- Wang, Y., Huang, F. and Wei, Y. (2013). Water body extraction from LANDSAT ETM+ image using MNDWI and K-T transformation. *21st International Conference on Geoinformatics*, Kaifeng, pp. 1-5.
- Xu, H. (2005). A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remoting Sensing*. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YGXB200505011.htm
- Yuan, F. and Bauer, M. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106 (3), 375-386.