

El gran paleohumedal de la Pampa del Tamarugal: megafauna y poblamiento humano en el Norte de Chile

Orlando Acosta¹

Mario A. Rivera²

Recibido el 10 de julio de 2022; aceptado el 31 de agosto de 2022

Resumen

La gran cuenca endorreica de la Pampa del Tamarugal (PDT) ubicada en el árido norte de Chile experimentó importantes eventos de recarga hidrológica en el Pleistoceno tardío desde por lo menos 25,4 ka AP hasta 10,8 ka AP, bajo un régimen climático que posibilitó la existencia de humedales permanentes responsables de la confirmada presencia de megafauna y de las primeras ocupaciones humanas. Este trabajo propone que esas condiciones climáticas favorables debieron ser suficientemente estables y prolongadas, probablemente a escala milenaria, para permitir la generación de los ecosistemas necesarios, y luego, la inmigración y sobrevivencia de la megafauna y de los primeros humanos en habitar este territorio. Los resultados obtenidos sugieren que los paleohumedales de Pintados y Bellavista formaban parte de un solo gran paleohumedal depocéntrico de aproximadamente 620 km², cuyo perímetro resulta coherente con la localización de los hallazgos reportados de megafauna pleistocénica. Mediante la aplicación de un modelo numérico de flujo subterráneo se estimó que la recarga que reproduce este paleohumedal es solo dos veces mayor que la recarga actual, sugiriendo que cambios no tan radicales del clima fueron capaces de provocar cambios trascendentes en los ecosistemas húmedos de la PDT. Durante el Holoceno tardío desde 3,0 ka AP a

¹ ALHSUD, Capítulo Chileno; Gestionare Consultores, Santiago, Chile, correo electrónico: oacosta@gestionare.cl

² ICOMOS-CHILE, International Scientific Committee on Archaeological Heritage Management (ICAHM), Chicago Field Museum Natural History, e-mail: marivera41@gmail.com

0,7 ka AP otras ventanas climáticas húmedas posibilitaron el desarrollo de los primeros establecimientos aldeanos que practicaron una agricultura intensiva.

Palabras clave: Pampa del Tamarugal, paleohumedal, megafauna.

Abstract

The great paleowetland of the Pampa del Tamarugal: megafauna and human settlement in Northern Chile

The large endorheic basin of the Pampa del Tamarugal (PDT) shows evidence that, during the Late Pleistocene (PTa) and the Early Holocene (HTe) (25.4 ka AP at 10.8 ka AP), important hydrological recharge events occurred that enabled the presence of permanent wetlands responsible for the confirmed presence of megafauna and the first human occupations. The favorable climatic conditions in this period were sufficiently prolonged, probably on a millennial scale, to allow the generation of the necessary ecosystems, and then the immigration and survival of the megafauna and the first humans to inhabit this territory. The paleowetlands of Pintados and Bellavista were part of a single large depocentric paleowetland of approximately 620 km², whose boundaries are consistent with the location of the reported findings of Pleistocene megafauna. By applying a groundwater flow numerical model, it was estimated that the recharge reproduced by this paleowetland is only 2.0 times greater than the current recharge, suggesting that not-so-radical changes in the climate were able to cause momentous changes in the humid ecosystems of the PDT.

Key words: Pampa del Tamarugal, Paleowetland, Megafauna.

Résumé

La grande paléozone humide de la Pampa del Tamarugal : mégafaune et peuplement humain dans le nord du Chili

Le grand bassin endoréique de la Pampa del Tamarugal (PDT) situé dans le nord aride du Chili a connu d'importants événements de recharge hydrologique à la fin du Pléistocène d'au moins 25,4 ka AP à 10,8 ka AP, sous un régime climatique qui a permis l'existence de zones humides permanentes responsables de la présence confirmée de mégafaune et des premières occupations humaines. Ce travail propose que ces conditions climatiques favorables doivent avoir été suffisamment stables et prolongées, probablement à une échelle ancienne, pour permettre la génération des écosystèmes nécessaires, puis, l'immigration et la survie de la mégafaune et des premiers humains à habiter ce territoire. Les résultats obtenus suggèrent que les paléohumédals de Pintados et Bellavista faisaient partie d'un seul

grand paléohumedal despotocrique d'environ 620 km², dont le périmètre est cohérent avec l'emplacement des découvertes signalées de mégafaune du Pléistocène. En appliquant un modèle numérique de l'écoulement souterrain, il a été estimé que la recharge reproduite par ce paléohuméal n'est que deux fois plus élevée que la recharge actuelle, ce qui suggère que des changements climatiques moins radicaux ont pu provoquer des changements transcendants dans les écosystèmes humides de la PDT. Au cours de l'Holocène tardif de 3,0 ka AP à 0,7 ka BP d'autres fenêtres climatiques humides ont permis le développement des premiers établissements villageois qui pratiquaient l'agriculture intensive.

Mots-clés: Pampa del Tamarugal, Paléohumedal, Mégafaune.

Resumo

A grande paleowetland da Pampa del Tamarugal: megafauna e assentamento humano no norte do Chile

A grande bacia endoréica do Pampa del Tamarugal (PDT) localizada no árido norte do Chile experimentou importantes eventos de recarga hidrológica no Pleistoceno Tardio de pelo menos 25,4 ka AP a 10,8 ka AP, sob regime climático que permitiu a existência de zonas úmidas permanentes responsáveis pela presença confirmada da megafauna e das primeiras ocupações humanas. Este trabalho propõe que essas condições climáticas favoráveis devem ter sido suficientemente estáveis e prolongadas, provavelmente em escala antiga, para permitir a geração dos ecossistemas necessários e, em seguida, a imigração e a sobrevivência da megafauna e dos primeiros humanos a habitar esse território. Os resultados obtidos sugerem que os paleohumedales de Pintados e Bellavista faziam parte de um único grande paleohumedal depocêntrico de aproximadamente 620 km², cujo perímetro é consistente com a localização dos achados relatados da megafauna do Pleistoceno. Ao aplicar um modelo numérico de fluxo subterrâneo, estima-se que a recarga reproduzida por este paleohumedal seja apenas duas vezes mais alta que a recarga atual, sugerindo que mudanças não tão radicais no clima foram capazes de causar mudanças transcendentais nos ecossistemas úmidos do PDT. Durante o Holoceno tardio de 3.0 ka AP para 0,7 ka BP outras janelas climáticas úmidas permitiram o desenvolvimento dos primeiros estabelecimentos da aldeia que praticavam agricultura intensiva.

Palavras-chave: Pampa del Tamarugal, Paleohumedal, Megafauna.

1. Introducción

La Pampa del Tamarugal (PDT) actualmente es una gran cuenca endorreica (17,353 km²) situada en el Desierto de Atacama, en la Depresión Intermedia, caracterizada por condiciones climáticas de hiperaridez ($P < 5$ mm/a) que solo permiten el desarrollo de pequeños riachuelos permanentes ($Q < 0,3$ m³/s) que bajan de las zonas montañosas y desaparecen en los piedemontes sin formar una red interconectada de cursos de agua superficial. La recarga hidrológica actual escurre principalmente en forma subterránea hasta la parte terminal del sistema hidrodinámico (depocentro de la cuenca), donde es descargada por evaporación y evapotranspiración desde los salares de Pintados y Bellavista, sin llegar a generar cuerpos lagunares ni vegetación hidrófila (Figura 1).

No obstante, esta condición de extrema aridez no siempre fue así. Existe evidencia que muestra que durante el Pleistoceno tardío (PTa) ocurrieron importantes eventos de recarga hidrológica en la PDT (Magaritz *et al.*, 1990; JICA, 1993; Nester *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, 2013) que generaron ecosistemas húmedos permanentes soportados por un nivel alto del nivel freático (Nester *et al.*, 2007; Blanco *et al.*, 2012; Pfeiffer *et al.*, 2018), y otros menos relevantes durante el Holoceno tardío (HTa) (2,5 ka AP a 0,7 ka AP) (Nester *et al.*, 2007), coincidentes con el desarrollo de los primeros establecimientos aldeanos que practicaron una agricultura intensiva con una feble sobreproducción 2,5 ka AP (Rivera, 2005; Uribe *et al.*, 2015).

Aún no está claro si estas ventanas climáticas húmedas ocurrieron como eventos de escala centenaria o por períodos más prolongados que duraron milenios. Tampoco se ha estudiado por completo la intensidad de estos episodios, el origen de la precipitación, o su alcance regional en el contexto de Los Andes Centrales.

Considerando que en la PDT está confirmada la presencia de megafauna y de las primeras ocupaciones humanas en el PTa desde 12,8 ka AP y hasta el comienzo del Holoceno, por lo menos (Frassinetti y Alberdi, 2001; Blanco *et al.*, 2012; Latorre *et al.*, 2013), este trabajo propone que las condiciones climáticas favorables del PTa que hicieron posible el establecimiento de estos ecosistemas húmedos permanentes claves para la existencia de humanos y animales, tuvieron que iniciarse con anterioridad y por un tiempo suficientemente prolongado, probablemente de escala milenaria, para permitir la inmigración y sobrevivencia de la megafauna y de los primeros grupos humanos en habitar este territorio.

Este trabajo estudió la cronología de los cambios climáticos y sus efectos en las recargas hidrológicas de diversos intervalos de tiempo que condicionaron momentos claves en el desarrollo de la fauna, así como de los diferentes grupos humanos que habitaron el desierto. Se desarrolló bajo la hipótesis de que no mucha más recarga hidrológica que la actual pudo ser

capaz de justificar la presencia de un gran paleohumedal en la PDT ya que la evaporación y evapotranspiración son las únicas salidas actuales del sistema, si bien sería necesario estudiar mejor las probables salidas superficiales que pudo tener la cuenca en el pasado. Para probar la hipótesis anterior se utilizó en primer lugar, un modelo numérico de flujo subterráneo, elaborado previamente para la Dirección General de Aguas (DGA, 2017), para reproducir el perímetro completo de los paleohumedales de Pintados y Bellavista con límites coherentes con la localización de las paleoriberas del PTa datadas por Pfeiffer *et al.* (2018) y, posteriormente, se analizó su relación con la ubicación de los hallazgos recopilados de fauna extinta y de presencia humana.

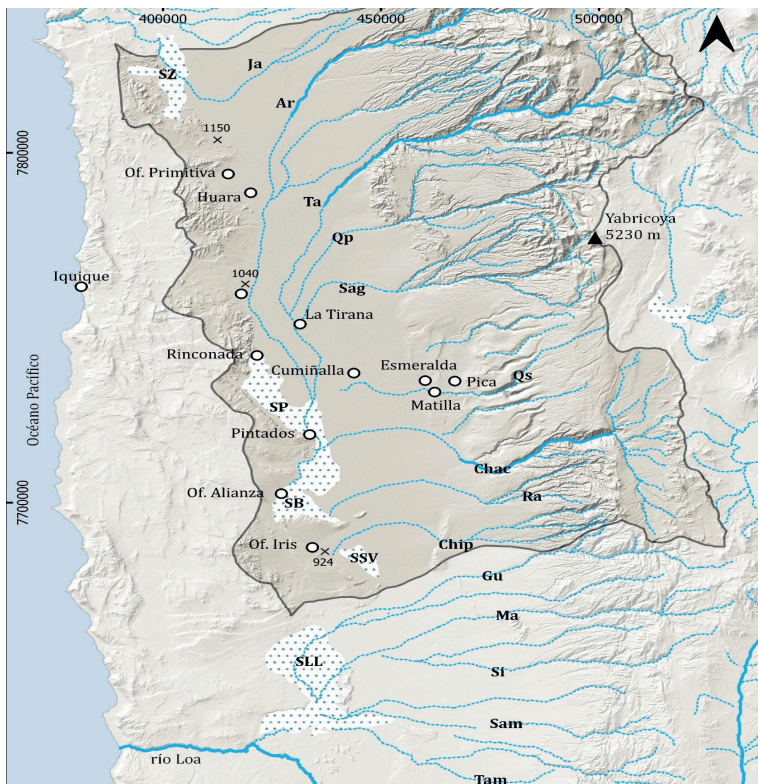


Figura 1. Mapa de la cuenca de la PDT y parte de la cuenca del río Loa mostrando los cursos de agua permanentes y efímeros que bajan desde las cerranías del Este. SZ Salar de Zapiga; SP Salar de Pintados; SB Salar de Bellavista; SSV Salar Sur Viejo; SLL Salar de Llamara. Ja Jazpampa; Ar Aroma (Perm); Ta Tarapacá (Perm); Qp Quipsca; Sag Sagasca; Qs Quisma; Chac Chacarillas (Perm); Ra quebrada de Ramada; Chip Chipana; Gu Guatacondo (Perm); Ma Maní; Si Sipuca; Sam Sama; Tam Tambillo (elaboración propia).

2. Metodología

2.1 *Hipótesis de contexto*

Los hallazgos reportados y citas históricas de restos de fauna extinta en la PDT, como megaterios y gonfoterios, se localizan preferentemente en el sur de la cuenca cerca de su depocentro (Casamiquela, 1972; Casamiquela y Sepúlveda, 1974; Frassinetti, 1982; Frassinetti y Alberdi, 2001; Blanco *et al.*, 2012, Pfeiffer *et al.*, 2018), donde existió un ecosistema ribereño con abundante vegetación azonal y, sobre todo, cuerpos de agua superficial permanente, necesarios para permitir la vida de esta megafauna. Recientemente, la presencia de vestigios de este paleohumedal con vegetación y agua en lámina libre fue comprobada por Pfeiffer *et al.* (2018) en las zonas de Pintados y Bellavista.

Complementariamente a la existencia de estos humedales, la presencia de un extenso bosque freatófito de tamarugos (*Prosopis sp.*) como parte del paleoambiente de la PDT en el en el PTa-HTe (Olson *et al.*, 2019), puede haber conformado un hábitat propicio para la sobrevivencia exitosa de la megafauna, al generar corredores verdes que permitían su desplazamiento a otras zonas húmedas ubicadas en zonas más altas o distantes, como por ejemplo La Calera, Pica, e incluso al vecino Salar de Llamara (SLL).

Producto de las condiciones más lluviosas del PTa, y considerando que la PDT es una cuenca cerrada, toda la escorrentía subterránea y superficial de esas épocas húmedas, que fluía hasta la parte terminal del ciclo hidrodinámico (depocentro), conformaba allí un extenso humedal con cuerpos lagunares permanentes, los que fueron parcialmente localizados por Pfeiffer *et al.* (2018) en la zona del Salar de Bellavista. En cualquier caso, cabe destacar que aún es necesario estudiar mejor las probables salidas superficiales que pudo tener la cuenca en el pasado y si estas tuvieron significancia dentro del ciclo hidrodinámico del PTa, al punto que la cuenca en esa época funcionase como una cuenca abierta o semi-cerrada.

2.2 *Definición de la ubicación de paleoriberas de humedales pleistocénicos*

La probable ubicación de las paleoriberas de los humedales pleistocénicos, se infirieron preliminarmente desde imágenes satelitales recientes en coherencia con los resultados del trabajo de Pfeiffer *et al.* (2018) que identificó en formaciones geológicas del Pleistoceno, vestigios de vegetación ribereña y presencia de agua en lámina libre en el Salar de Bellavista. En las imágenes satelitales actuales se aprecian tres grandes zonas de probables fondos lagunares/humedales en la PDT: una al norte en el sector del Salar de Zapiga, otra desde Pintados hasta Cumiñalla, y una más al sur en la zona

del Salar de Bellavista. La modelación hidrogeológica que se presenta en este trabajo se centra en las dos últimas áreas en consideración a las limitaciones geométricas del modelo numérico como se explica a continuación.

2.3 Modelación de la recarga que permiten validar la ubicación de las paleoriberas

Con la ayuda de un modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero de la PDT elaborado previamente para la Dirección General de Aguas (DGA, 2017), se ensayaron varias magnitudes de recarga hidrogeológica tal que se generasen humedales dependientes del nivel freático que calzaran con las dimensiones de los paleohumedales identificados.

Este modelo fue originalmente desarrollado para reproducir el sistema de flujo del régimen natural del acuífero de la PDT con el clima actual (1960) y alterado por bombeos al año 2016. Se trata de un modelo numérico de flujo subterráneo en régimen permanente, elaborado en el código MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1984) por Hídrica Consultores para la DGA. El código MODFLOW fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos a comienzos de la década de 1980 y en el presente es considerado como un código estándar para simulaciones de acuíferos a nivel global. En MODFLOW la ecuación de flujo subterráneo se discretiza usando un método de control de volumen por diferencias finitas, la que combinada con un balance hídrico en un pequeño volumen de control queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q'_s = SS \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica para los ejes coordenados x , y , z ; h es la pérdida de carga hidráulica; Q'_s es el flujo volumétrico por unidad de volumen representada como el suministro o descarga de agua; SS es el almacenamiento específico del medio poroso; t es el tiempo.

En la Figura 2 se pueden apreciar los límites del modelo, así como la extensión de los humedales en el año 1960, cuando estaba conformado casi exclusivamente por árboles de tamarugos sin significativa presencia de especies arbustivas o herbáceas. Nótese que el dominio de simulación no incluye la parte norte del acuífero de la PDT donde se sitúa el Salar de Zapiga y tampoco el Salar de Sur Viejo, restricción geométrica del modelo numérico que limitó la posibilidad de este trabajo de analizar las áreas de paleohumedales en esas zonas.

Al modelo numérico se le realizaron algunas modificaciones para ajustar parámetros que se consideraron no apropiados al medio simulado, entre las que destacan las siguientes:

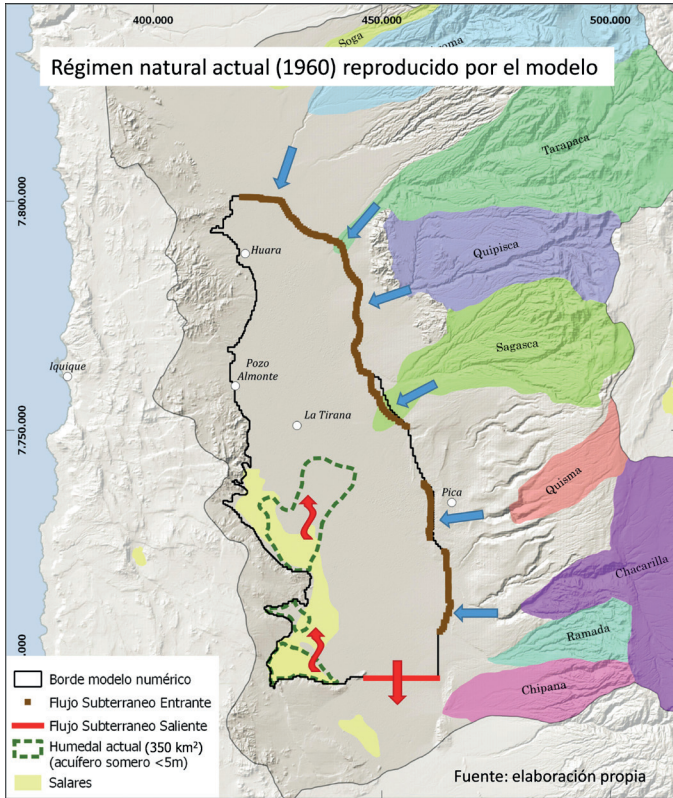


Figura 2. Límites del modelo numérico DGA (2017) y representación del perímetro de las zonas húmedas reproducidas por el modelo para el régimen natural actual al año 1960 (elaboración propia).

- Leve aumento de la tasa de evaporación (EV) desde 2200 a 2300 mm/año y disminución de la profundidad de extinción de la EV de 15 a 5 m de acuerdo con los resultados del trabajo de Johnson et al. (2010).
- Asignación de la función de EV a todo el modelo, para que durante la ejecución de las simulaciones, el modelo definiera la zona evaporante efectivamente activa en función de la profundidad modelada del nivel freático.
- Corrección de zonas de conductividad hidráulica en la zona norte del modelo por ser éstas excepcionalmente bajas en el modelo de Hídrica Consultores (0,3 a 0,04 m/día), pasando en el modelo corregido a 1 m/día.

Cabe señalar que estos cambios no modificaron el balance de masa ni la calibración del modelo numérico cuando simula el régimen actual, por lo que se considera que los ajustes realizados no perturbaron la coherencia del modelo.

Para conformar preliminarmente las condiciones paleoclimáticas y así estimar la recarga que reproduce los paleohumedales del pleistoceno se procedió de la siguiente manera:

- A partir de la condición actual, se incrementó la recarga subterránea proveniente de las subcuencas cordilleranas hasta lograr reproducir el perímetro de las zonas de paleohumedales inferidas desde imágenes satelitales y ubicaciones reconocidas de paleoriberas reportadas por Pfeiffer *et al.* (2018).
- Se realizaron varias simulaciones con diferentes niveles de recarga para validar y/o acotar el rango de 1,5 a 4 veces que previamente habían estimado otros investigadores como Pfeiffer *et al.* (2018).
- El ascenso del nivel freático en el modelo numérico permitió recrear los límites de las zonas de paleohumedales, las que se asumieron discrecionalmente como aquellas en el acuífero era somero con un nivel estático <5 m. Además, dentro de estas zonas húmedas, se supusieron las áreas donde podrían haberse generado cuerpos lagunares aislados o conectados entre sí, como aquellas donde el nivel del acuífero era <1 m de profundidad.

Vale destacar que las condiciones paleoclimáticas simuladas solo consideraron el incremento del aporte subterráneo al humedal, y no el muy probable aumento de la escorrentía superficial de las quebradas laterales que también debieron aportar al humedal en forma estacional en la temporada de lluvias. La correcta consideración de estas escorrentías debería ser objeto de un estudio mayor alcance y detalle.

2.4. Recopilación bibliográfica de datos paleoclimáticos, arqueológicos, paleontológicos e isotópicos en el contexto de la PDT

Se realizó una recopilación bibliográfica de información paleoclimática, arqueológica, paleontológica, isotópica de madera nueva y antigua, e isotópica y de datación radiocarbónica tanto de agua subterránea como de paleovegetación arbórea y ribereña.

Asimismo, para validar la delimitación y coherencia espacial de la extensión de los paleohumedales pleistocénicos, se realizó una compilación bibliográfica de los hallazgos paleontológicos y arqueológicos en el contexto de la PDT, incluyendo la datación de estos cuando la información estuvo disponible en los estudios e informes seleccionados.

3. Resultados y Discusión

3.1. Condiciones paleoclimáticas, hidrogeología y paleohumedales durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno en la PDT

La climatología del Desierto de Atacama es el resultado de un dinámico sistema de relaciones multiescalares, comandadas por el Monzón de América del Sur y sus interacciones con la Oscilación del Sur (Fenómenos El Niño-La Niña), la Oscilación Decadal del Pacífico y la Oscilación Antártica (Romero *et al.*, 2012). Este complejo sistema océano-atmósfera, ha determinado un clima desértico en la PDT por lo menos desde el Mioceno Medio hace 15-10 Ma (Houston y Hartley, 2003; Amundson *et al.*, 2012), caracterizado por un patrón de lluvias estacionales y una gran variabilidad interanual de las precipitaciones.

En la actualidad, las condiciones climáticas de la PDT se manifiestan normalmente con la ocurrencia de años completamente secos, hasta otros muy excepcionales en que sobre las montañas de la cordillera de Los Andes que bordean por el oriente a la PDT pueden llegar a precipitar hasta cerca de 385 mm anuales (Romero *et al.*, 2013; Acosta y Custodio, 2008; Acosta, O., 2005). En las zonas bajas (~950 a ~1000 msnm) sin embargo, raramente precipitan más de 3 mm por año incluso en esos años extraordinarios.

En el sector oeste de la cordillera de Los Andes donde se ubica la PDT, las altas presiones asociadas al Anticiclón Semi-permanente del Pacífico del Sudeste y sus inversiones térmicas de subsidencia y radiación, que se deben al predominio constante de las surgencias de aguas subantárticas de la Corriente de Humboldt, impiden completamente la formación de nubes de altura y por lo tanto la ocurrencia de precipitaciones provenientes del Océano Pacífico desde la costa hasta 120 km al interior y por lo menos 3000 m de altitud.

En la latitud de la PDT la alta cordillera de Los Andes (4,000-5,200 m de altura) representa una frontera para la circulación atmosférica, separando casi completamente a la PDT del sector este o continental dependiente de la Amazonia. Pero en términos de decenios y aun centenios se producen eventos pluviométricos gatillados por el desbalance a favor de los vientos orientales amazónicos cargados de humedad que se manifiestan normalmente en épocas del verano. Ellos representan la extensión más austral del Monzón de Verano Sudamericano (SASM), conectado a la variabilidad del fenómeno de El Niño (Romero *et al.*, 2013). Estos eventos de lluvias extraordinarias en ocasiones abarcan las cabeceras de las subcuencas que tributan a la PDT desde el oriente, pudiendo ser potenciados por la presencia de la fase fría de ENSO, como ocurrió por ejemplo en los años 1974, 1984 y 2001, cuando eventos La Niña causaron precipitaciones estivales (enero-febrero-marzo) de 280, 300 y 350 mm, respectivamente, sobre los 3800 metros de altitud.

Sin embargo, existe abundante evidencia que indica que este patrón climático y condición de extrema aridez no siempre ha imperado en la zona. Dataciones radiocarbónicas del agua subterránea almacenada en el acuífero de la PDT, así como de restos de paleovegetación presentes en algunos sectores de la cuenca muestran que durante el Pleistoceno tardío

(PTa) ocurrieron importantes eventos de recarga hidrológica destacando los períodos 18 ka a 13,75 ka AP y 12 ka a 10,8 ka AP (Magaritz *et al.*, 1990; JICA, 1993; Nester *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, 2013). Las consecuencias de tales condiciones hidrológicas se tradujeron en el escurrimiento de ríos permanentes que bajaban de las serranías orientales recargando recurrentemente los acuíferos que presentaban un nivel alto del nivel freático a consecuencia de ello, permitiendo el desarrollo de ecosistemas vegetales húmedos (freatófitas, higrófitas, halófitas) y animales (camélidos, cánidos, octodóntidos, megaterioideos) que contrastan notablemente con las condiciones de hiperaridez que actualmente existen en esta región (Nester *et al.*, 2007; Gayo *et al.*, 2012; Blanco *et al.*, 2012; Pfeiffer *et al.*, 2018).

Posteriormente durante el Holoceno tardío (HTa) en el período 2,5 ka a 0,7 ka AP también hubo otros ciclos climáticos lluviosos menos relevantes que aquellos del Pleistoceno, pero igualmente húmedos en términos comparativos con el clima actual (Nester *et al.*, 2007; Uribe *et al.*, 2020) que permitieron el apogeo de asentamientos agrícolas en la PDT asociados, en ciertos casos, a extensos campos de cultivo regados con las aguas de ríos permanentes proveniente de las quebradas que desembocaban en la pampa (Rivera 2005; Uribe *et al.*, 2020), pero que presumiblemente ya no alcanzaban a llegar al decopcentro de la PDT como sí ocurrió en el PTa.

Recientemente Olson *et al.* (2019) estudiaron la variabilidad hidroclimática en el ámbito regional de la PDT durante los últimos 9,5 ka, midiendo los isótopos de Oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en anillas de árboles de Tamarugo (*Prosopis tamarugo*) y estimando la humedad relativa del aire (HR) y la eficiencia intrínseca del uso del agua de estas plantas (iWUE). El Tamarugo es una especie arbórea freatofítica que se alimenta del agua freática a profundidades <10 m (Mooney *et al.*, 1980; Ehleringer *et al.*, 1992) y esporádicamente de escorrentías superficiales provenientes de arroyos cordilleranos que inundan los sectores bajos de la PDT. Las muestras de madera analizadas correspondieron a bosques residuales modernos (1954-2016) ubicados en la PDT y a restos de árboles antiguos tendidos sobre la superficie del Salar de Llamara (LLA) y a otros que sirvieron de postes en las habitaciones de las aldeas de Caserones (PDT), Ramaditas (LLA) y Huatacondo (LLA).

Según estos autores, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los árboles modernos pasaron de valores cercanos a 33,5 ‰ en la década de 1950 a 31‰ en la década de 2010, mostrando una clara disminución de la disponibilidad hídrica para estos árboles durante los últimos 70 años. En concordancia con lo anterior, en este período la iWUE aumentó en un 40% mostrando la adaptación fisiológica de las plantas a condiciones de menor suministro hídrico. La información de los árboles antiguos indicó que las condiciones hidroclimáticas en el período 9,7 ka a 7,7 ka AP habrían sido secas y relativamente similares a las actuales,

con un régimen de oscilación climática de aproximadamente 300 años. Esto indicaría que las condiciones más húmedas que caracterizaron el PTa ya habían comenzado a cambiar al comienzo del Holoceno, provocando una reducción en la disponibilidad de recursos hídricos en la región y la profundización del nivel freático que impactó negativamente a los humedales que se generaron en la PDT durante el Pleistoceno. Posteriormente, a mediados del Holoceno los resultados de Olson *et al.* (2019) sugieren que nuevamente se habría producido un cambio climático hacia condiciones más húmedas y con una mayor variabilidad interanual caracterizada por una alternancia de episodios húmedos y otros más secos. En efecto, el análisis conjunto de la información de $\delta^{18}\text{O}$, iWUE y HR del período 5,0 ka a 1,8 ka AP indicaría que durante esos tres milenios las condiciones hidroclimáticas volvieron a ser favorables para la recarga de los sistemas hidrogeológicos y el patrón de oscilación climática disminuyó a aproximadamente 200 años. En este período los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de la madera antigua son significativamente diferentes a los de los árboles modernos, con valores de $\delta^{18}\text{O}$ más pesados, del orden de 36‰, lo que indicaría un clima probablemente más frío y húmedo que el actual durante el período 5,0 ka a 1,8 ka AP. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ promedio de la madera del período que se indica y otras variables estimadas a partir de esos valores.

Tabla 1. Resumen de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ promedio de la madera del período que se indica y otras variables estimadas a partir de esos valores

Isotópos y variables	Á. modernos (1954-2016)	Árboles antiguos					
		1,8-1,9 ka AP	2,4-2,5 ka AP	5 ka AP	7,7 ka AP	8,3-8,5 ka AP	8,6-9,7 ka AP
$\delta^{18}\text{O}$	32,2 (29,5-35)	36 (32,5-41)	36 (32-41)	36,2 (32,5-39,5)	32 (31-33)	33 (30,5-35)	31,2 (29-33)
HR	39-42%	4-0%	39-52%	41-48%	44%	39-44%	39-47%
iWUE	62-76	52-57	55-57	47-52	44-46	46-59	40-50

Fuente: elaboración propia desde la información presentada por Olson *et al.* (2019).

Las condiciones hidrológicas húmedas que primaron en el Pleistoceno Tardío (PTa) desde por lo menos ~18 ka a 13,75 ka AP y desde 12 ka a 10,8 ka AP se tradujeron en el escurrimiento de ríos permanentes (Nester *et al.*, 2007) que bajaban de las serranías orientales recargando el acuífero de la PDT. Debido a su mayor área aportante y a la mayor altura de sus cabeceras es probable que las quebradas Aroma, Tarapacá y Chacarilla tuviesen cursos de aguas que permanentemente llegaban hasta el llano mientras que aquellos de las quebradas Jazpampa, Quipisca, Sagasca, Quisma, Ramada y Chipana

podieron tener un régimen estacional y confluir con los flujos de las primeras en la planicie de la PDT solo algunos meses del año.

Este régimen fluvial pleistocénico recargaba el acuífero de la PDT siguiendo el curso de los cauces superficiales y en las zonas bajas de la llanura donde regularmente todos ellos confluían acumulando gran cantidad de agua. Como consecuencia de lo anterior, en las zonas depocéntricas ubicadas en los actuales salares de Pintados y Bellavista, los suelos se encontraban saturados por estos aportes superficiales y debido al nivel freático somero que presentaba el acuífero, generándose humedales permanentes y cuerpos lagunares. Pfeiffer *et al.* (2018) en el Salar de Bellavista dataron cinco perfiles de paleohumedal con presencia de agua en lámina libre cuya edad situaron en el período 25,4 ka a 16,2 ka AP y otro sin agua libre de 12,7 ka AP. Por su parte, en el Salar de Pintados reportaron un perfil de paleohumedal sin agua libre de 11,4 ka AP. Esta información permite estimar que la ventana húmeda del PTa se habría iniciado antes que lo mencionado por Nester *et al.* (2007), hacia ~25,4 ka AP.

Estos paleohumedales desde el punto de vista de su sustento hídrico correspondían a humedales de tipo mixto hipogénico-epigénico, es decir, alimentados tanto por agua subterránea como por agua superficial. Es posible estimar que la extensión y la permanencia en el tiempo de los cuerpos lagunares presentes en estos paleohumedales debió estar muy relacionada y ser muy sensible a la continuidad del régimen fluvial de los ríos a consecuencia del régimen pluviométrico de las zonas altas. Solo algunos años sin o con pocas lluvias pudieron haber sido suficientes para secar la mayor parte de estas lagunas, con consecuencias catastróficas para la megafauna y los humanos que dependían de ellas. En esta línea argumentativa, sería posible plantear que en el Pleistoceno tardío, desde por lo menos ~25,4 ka a 10,8 ka AP, el régimen pluviométrico sobre las montañas de la cordillera de Los Andes que bordean por el oriente a la PDT, no solo debió ser más húmedo en promedio que el actual, sino más estable, sin las intercalaciones de años secos que ocurren con el patrón climático del presente.

Desde esa perspectiva, de manera muy preliminar puede plantearse que la magnitud de las lluvias extraordinarias que se generan actualmente con eventos del tipo La Niña –del orden de 300 a 350 mm sobre los 3800 metros de altitud–, que son las únicas capaces de generar escorrentías que llegan a las partes bajas de la PDT, podría ser un indicador referencial del mínimo pluviométrico del patrón de lluvias que acontecía en el Pleistoceno tardío. Por su parte, mediante una modelación hidrológica sería factible obtener una aproximación del máximo pluviométrico referencial del Pleistoceno tardío, pero de manera muy gruesa es posible proponer un valor de al menos 400-500 mm/año en años húmedos.

La información recopilada en el presente trabajo indica que las fases más importantes de recarga del acuífero de la PDT acontecieron durante el Pleistoceno tardío desde por lo menos ~25,4 ka a ~10,8 ka AP y luego otra de menor magnitud en el Holoceno tardío en el período 3,0 ka a 1,8 ka AP, y

un pulso menor en el lapso 1,0 ka a 0,7 ka AP ocurrido durante la Anomalía Climática Medieval (Nester *et al.*, 2007). Esto explica que las dataciones radiocarbónicas del agua del acuífero muestran que la mayor parte de los 26.000 hm³ de agua almacenada son de una edad >10 ka AP (JICA, 1993; Acosta *et al.*, 2013), confirmando la importancia del Pleistoceno tardío como período de mayor recarga a los acuíferos. En efecto, los isótopos del Carbono indican tiempos medios de residencia del agua subterránea en el entorno de 5 ka a 15 ka AP en gran parte de los acuíferos de la Región de Tarapacá donde se ubica la PDT, superando los 20 ka y hasta 30 ka AP en el caso de aguas subterráneas profundas (Acosta *et al.*, 2013; Acosta, 2021), todo lo cual ratifica la existencia de prolongadas ventanas climáticas húmedas desde por lo menos el Pleistoceno tardío (ver Tabla 2).

Tabla 2. Número de muestras de aguas subterráneas en el rango de edades aparentes radiométricas en miles de años (ka) en la Región de Tarapacá, norte de Chile

Ubicación	Total	<5ka	5ka-10ka	10ka-15ka	>20ka
Altiplánicas	17	0	6	6	5
Precordillera	2	0	0	1	1
Depresión central	12	4	5	3	0
Total	31	4	11	10	6

Fuente: Acosta (2021) adaptado de Acosta *et al.* (2013).

La hidrogeoquímica y en especial los isótopos de Oxígeno e Hidrógeno del agua permiten diferenciar los orígenes del agua subterránea y sus fuentes de recarga. Efectivamente existe una marcada diferencia de origen entre las aguas subterráneas altiplánicas (>3800 m de altitud) que tienen valores de $\delta^{18}\text{O}$ del orden de -14‰ y de $\delta^2\text{H}$ cercanos a -110‰ y aquellas propias de la PDT cuyos valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -7,5‰ y -11‰ y de $\delta^2\text{H}$ entre -57‰ y -86‰. A pesar de que ambas zonas fueron recargadas hace milenios (Acosta *et al.*, 2013) en un período temporal coincidente (~25,4 ka a ~10,8 ka AP) y la lluvia precipitó en el mismo sector cordillerano a una altitud similar, la marca isotópica de las aguas subterráneas de la PDT es significativamente más pesada que las aguas subterráneas altiplánicas, indicando que el origen de la lluvia que recargó ambos sectores no debió ser el mismo. Esta evidencia sugiere que durante las ventanas climáticas húmedas del Pleistoceno Tardío pudo haber dos fuentes distintas de vapor de agua, una proveniente del oriente y nororiente amazónico que generaba lluvias isotópicamente ligeras, y otra originada en el Océano Pacífico que, ingresando en el continente desde el Oeste, producía lluvias más pesadas sobre la cara occidental de la cordillera Los Andes.

En este sentido, Jordan *et al.*, (2019), postularon la necesidad de reconsiderar las interpretaciones paleoclimáticas que identifican a la variabilidad de las fases de ENSO como la principal responsable de contribuir a la variabilidad climática del Desierto de Atacama durante los pasados 20 ka. Estas interpretaciones proponen que, al igual que ocurre en la actualidad, la fase fría de ENSO (eventos La Niña) era la que producía los eventos pluviométricos pleistocénicos gatillados por el desbalance a favor de los vientos orientales amazónicos cargados de humedad. Pero las lluvias actuales provenientes del este amazónico se caracterizan por valores de $\delta^{18}\text{O}$ del orden de -15‰ y de $\delta^2\text{H}$ cercanos a -110‰ (Aravena *et al.*, 1999) que no son capaces de explicar la marca isotópica más pesada de las aguas almacenadas en el acuífero de la PDT. En cambio, un trabajo reciente (Jordan *et al.*, 2019) que midió la marca isotópica de las lluvias costeras y precordilleranas (a 2666 msnm) actuales, 450 km al sur de la PDT (Región de Antofagasta), cuya fuente de vapor de agua fue la zona subtropical oriental y tropical del Océano Pacífico, reveló que los valores isotópicos de estas lluvias son más pesados y cercanos a los de las aguas subterráneas milenarias almacenadas en la PDT, con valores medios de $\delta^{18}\text{O}$ de $-2,8\text{‰}$ y de $\delta^2\text{H}$ de $-10,5\text{‰}$ en la zona costera, y $\delta^{18}\text{O}$ de $-6,2\text{‰}$ y de $\delta^2\text{H}$ de $-49,5\text{‰}$ en la zona precordillerana (Jordan *et al.*, 2019).

3.2 Presencia de megafauna pleistocénica en el contexto de la PDT

Desde finales del siglo XIX se ha reportado la presencia de osamentas de megafauna en el contexto de la PDT en diversos sectores que tienen como denominador común su cercanía a las orillas de los paleohumedales pleistocénicos donde había agua disponible. Estos hallazgos se concentran al sur de la PDT en el perímetro de la zona depocéntrica del Salar de Pintados, pero también en otros sectores adyacentes a paleohumedales ubicados en el área de Pica-Matilla-Esmeralda, oficina salitrera Primitiva (PDT), oficina salitrera Iris (salar de Sur Viejo) y Quebrada de Maní (SLL).

En 1876 Basadre reportó el hallazgo de osamentas de animales extintos en un lugar ubicado entre el antiguo pueblo La Rinconada y el caserío Cabrería cuya descripción permite clasificarlos como pertenecientes los géneros *Gomphotheriidae* e *Hippidion* (Casamiquela, 1972). Asimismo, indicó que en las cercanías del pueblo Cumiñalla en el canchón del señor Domingo Lecaros se encontraron huesos de un animal de grandes dimensiones identificado como un megaterio (Basadre, 1876; Billinghamurst, 1886).

En la década de 1880 Rodulfo Philippi fundó *Megatherium medinae* como una nueva especie con restos fósiles procedentes del área de Pica-Matilla (PDT), que le fueron enviados por José Toribio Medina en 1882, y Belisario Jara y Oscar Salbach en diferentes oportunidades entre 1884 y 1886 (Philippi, 1892-1893; Frassinetti, 1982; Frassinetti y Alberdi, 2001).

En forma contemporánea al trabajo de Philippi, Richard Lydekker en 1886 describió *Scelidotherium chilense* como una nueva especie, sobre restos procedentes del Pleistoceno de la PDT (Tarapacá), sector Esmeralda cerca de Pica, fundamentado sobre la base de tres cráneos imperfectamente preservados; la porción anterior de una mandíbula y un número considerable de vértebras y huesos de extremidades depositados en el Museo Británico (Frassinetti y Alberdi, 2001).

En 1926 Oliver Schneider relató el hallazgo de osamentas perteneciente a una especie del género *Gomphotheriidae* en la oficina salitrera Primitiva ubicada el sector norte de la PDT. Pocos años después, Latcham (1929) reportó y dibujó detalladamente defensas de *Gomphotheriidae* procedentes de Tarapacá, las que en opinión de Casamiquela (1972) corresponderían al mismo hallazgo comunicado previamente por Oliver Schneider (1926).

En 1957, en un sector cercano ubicado 5 km al norte de Esmeralda, el geólogo Giovanni Cecioni ubicó los restos casi completos de *Megatherium medinae* en las cercanías del cerro Longacho (Casamiquela y Sepúlveda, 1974; Blanco *et al.*, 2012). La asignación al Pleistoceno tardío que hace Casamiquela y Sepúlveda (1974) a las osamentas encontradas por Cecioni fue ratificada por Blanco *et al.* (2012) quienes determinaron una edad ^{14}C de 12,35 ka AP en restos leñosos ubicados 2 km al SE del hallazgo de Cecioni, en depósitos con idénticas posición estratigráfica, características sedimentarias y contenido orgánico a los descritos en el sitio de las osamentas, lo que permite confirmar y precisar los restos hallados por Cecioni como los correspondientes al biocrón más joven para esta especie (Blanco *et al.*, 2012).

Recientemente, Herrera *et al.* (2019) encontraron en la cuenca del Salar de Llamara en la sección distal del abanico aluvial de la Quebrada de Maní (sitio QM35), fragmentos óseos de megafauna extinta, posiblemente *Megatherium sp.*, *Hippidion sp.*, que dataron en 11,8 a 11,2 ka AP. En el sitio además hallaron conchas de agua dulce para las que los autores determinaron una edad ^{14}C de 17,01 a 16,98 ka AP.

Finalmente, Ivor Ostojic (com. pers. 18 Diciembre 2018) mencionó que, en la Oficina Salitrera Iris, a raíz de trabajos de construcción por parte de una empresa particular, se encontraron restos de grandes huesos que lamentablemente no fueron reportados. Al respecto, merece la pena apuntar que según Vásquez (2011) los habitantes de la antigua oficina Alianza ubicada en el Salar de Bellavista, eran conocidos como los “prehistóricos” por el mito de una lagunilla cercana en la cual había “monstruos” y “lagartos gigantes”.

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente el inventario de los hallazgos y reportes de megafauna en el contexto de la PDT elaborado en el marco de la investigación desarrollada en el presente trabajo.

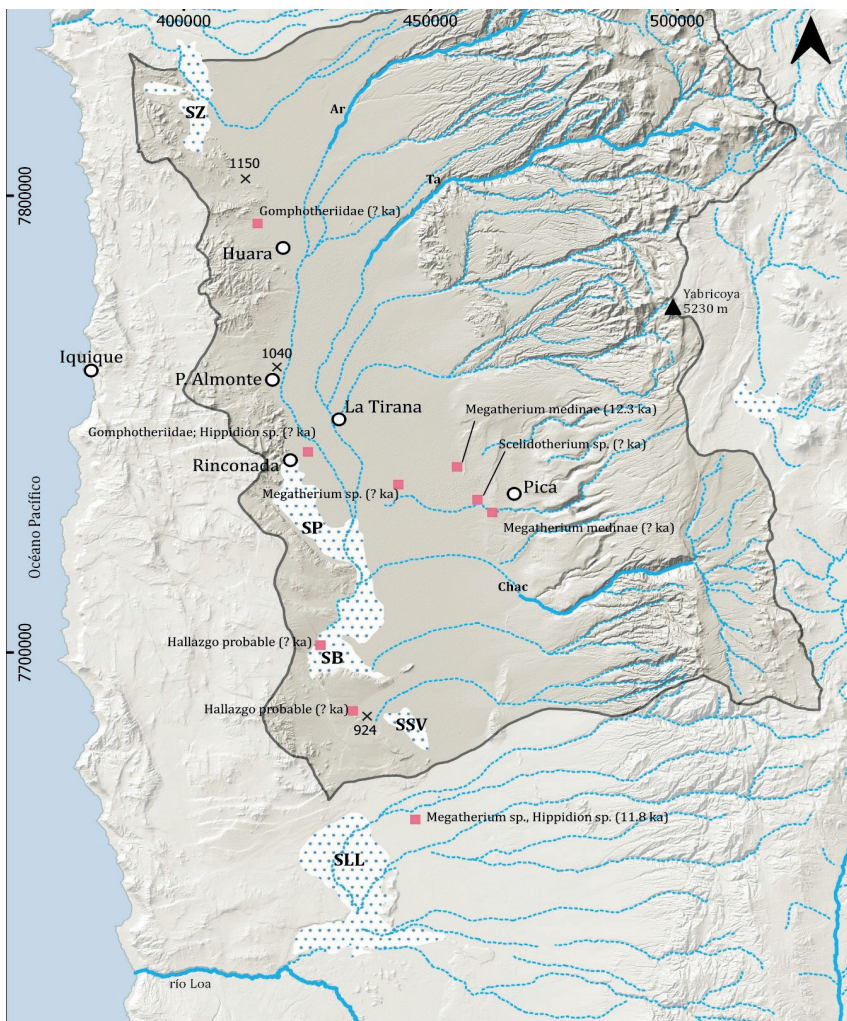


Figura 3. Ubicación de los hallazgos preliminares de megafauna en el contexto de la PDT (Elaboración propia desde Casamiquela, 1972; Casamiquela y Sepúlveda, 1974; Frassinetti, 1982; Frassinetti y Alberdi, 2001; Blanco *et al.*, 2012, Pfeiffer *et al.*, 2018; Herrera *et al.*, 2019).

3.3 Colonización humana y asentamientos humanos tempranos en la PDT

La extrema aridez y la altísima incertidumbre sobre los aportes pluviales ha determinado durante milenios la flora y fauna y la factibilidad de la ocupación humana en la PDT. La PDT ha sido desde temprano un área especial con condiciones paleoclimáticas que han posibilitado hallazgos importantes de especies de fauna pleistocena, desarrollo de grandes formaciones boscosas de

especies como el tamarugo, ubicación de los primeros asentamientos humanos y las primeras aldeas en conjunción con enormes extensiones de campos de cultivos, y en forma importante y crucial, el desarrollo de paleohumedales que atestiguan las diferentes condiciones ambientales en diferentes épocas. Es justamente esta última condición la que habría posibilitado la presencia de fauna pleistocena e hipotéticamente, la llegada de los primeros hombres al área de la PDT.

Las primeras evidencias de presencia humana halladas en el contexto de la PDT datan del fin del Pleistoceno tardío y el comienzo del Holoceno Temprano. En la Quebrada de Maní (QM12) las dataciones indican 12,8 ka a 12,3 ka AP (Latorre *et al.*, 2013), en el Salar de Pintados (PT1307) de 12,04 ka a 11,55 ka AP (Alvarado *et al.*, 2021) y en Tiliviche (1-B) 9,76 ka AP (Pfeiffer *et al.*, 2018) coincidentemente con la fase final de la ventana climática húmeda del Pleistoceno Tardío en la que ocurrieron los más importantes eventos de recarga hidrológica en la PDT (Magaritz *et al.*, 1990; JICA, 1993; Nester *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, 2013; Olson *et al.*, 2019).

En el caso de la Quebrada Maní, Latorre *et al.* (2013) indican evidencias concretas del sitio QM12 que incluyen elaboración de herramientas líticas, caza, elaboración de alimentos, y fogones preparados, además de la fabricación de pigmentos y la introducción de conchas de gasterópodos marinos. Esta evidencia muestra que, aparte de las tareas de subsistencia, el sitio fue utilizado para otras actividades sociales que posiblemente comprenden la decoración corporal, expresiones rituales y artísticas, siempre en un nivel de cazadores recolectores de alta movilidad grupal. Adicionalmente, Herrera *et al.* (2019) indica que el sitio QM35 abarca varios campamentos abiertos ubicados en lo alto de una formación de duna junto a un paleohumedal, en la sección distal del abanico aluvial de Quebrada Maní. Los mismos autores confirman, además, que hacia 12 ka AP estos grupos de cazadores frecuentemente acudían a la PDT aprovechando la oportunidad de obtener recursos locales dada la ubicación de los sitios en torno a algún humedal o sistema ribereño como en los casos de Chipana-1, QM12, QM32, QM35, PR5 y PR7. Aún más, estos autores proponen que la disponibilidad permanente de fuentes de agua dulce (subterránea y superficial) en la PDT hacia el final del Pleistoceno, permitió a los cazadores-recolectores mantener circuitos locales durante todo el año.

Estos grupos humanos que se habían establecido en el entorno de la PDT durante al menos tres milenios (12,8 ka a 9,76 ka AP) aprovechando la parte final de la ventana climática húmeda del PTa, debieron enfrentar las consecuencias de un cambio climático hacia condiciones hidroclimáticas más secas y relativamente similares a las actuales que se habría producido a contar del Holoceno temprano. De acuerdo con las dataciones de madera de Olson *et al.* (2019) y polen de Uribe *et al.* (2015) este cambio climático se produjo desde 9,7 ka AP y pudo prolongarse por seis milenios concluyendo 3,3 ka AP. La ausencia de sedimentos de este período en los perfiles estratigráficos

de terrazas fluviales datadas por Nester *et al.* (2007) podría considerarse como una confirmación de la prolongada “sombra pluviométrica” que se habría producido en la PDT desde el Holoceno temprano hasta el fin del primer milenio del Holoceno tardío. En ese período los ríos retrocedieron y dejaron de inundar la llanura de la pampa, y el nivel freático del acuífero se profundizó disminuyendo el aporte hídrico a los humedales ribereños y depocéntricos que se habían consolidado durante el Pleistoceno. Los mayores efectos sobre estos grupos humanos tempranos que colonizaron la PDT durante el Pleistoceno debieron ser la reducción en la disponibilidad de agua para la bebida (alejamiento de los ríos y desecación de lagunas) y la disminución de las especies de flora y fauna que constituían su fuente de alimento. Los cuerpos lagunares de los humedales depocéntricos, que eran probablemente perennes durante el Pleistoceno tardío, devinieron en estacionales y efímeros hasta su eventual desecación, debido a su alta sensibilidad con respecto a la continuidad del régimen fluvial de los ríos ligado a la pluviometría de las zonas altas. A menos que la demanda evapotranspirativa de ese período haya sido significativamente menor que la actual a consecuencia de un clima más frío, unos pocos años con menores lluvias pudieron ser suficientes para desecar la mayor parte de estas lagunas, con consecuencias catastróficas para la megafauna y los humanos que dependían de ellas.

En los siguientes milenios estas condiciones secas del Holoceno Temprano fueron interrumpidas nuevamente por fluctuaciones climáticas que permitieron mejoras periódicas de la intensa aridez que se produjo durante el Holoceno medio y tardío.

El período húmedo más reciente del Holoceno tardío se inició ~2,5 ka AP según Nester *et al.* (2007) y Uribe *et al.* (2020) y ~5,0 ka AP de acuerdo con los resultados de Olson *et al.* (2019). Esta ventana climática favorable coincide con el desarrollo de los primeros establecimientos aldeanos que practicaron una agricultura intensiva a contar de 3,0 ka a 2,5 ka AP (Rivera, 2005; Uribe *et al.*, 2015), cuando comenzaron a establecerse en las tierras áridas de la PDT y su entorno, grupos humanos que desarrollaron una agricultura por riego, como queda de manifiesto en sitios como Ramaditas y G-1 en la Quebrada de Guatacondo (LLM), y Pampa Iluga y Caserones (PDT) (Figura 4 y Figura 5).

La imponente aldea de Caserones habría tenido una ocupación estacional a partir de 2,0 ka AP y continua desde 1,1 ka AP desarrollándose durante sucesivas etapas un poblado que llegó a constituir más de 600 estructuras arquitectónicas. Caserones representa el punto clave donde se encuentra la PDT y la Quebrada de Tarapacá. A juicio de Uribe *et al.* (2015) Caserones representaría una respuesta eficiente de un modo de vida agromarítimo con una población agrícola y recolectora de tiempo completo desde el Formativo Temprano, con un énfasis en la explotación del tamarugo, maíz y quinua. Un aspecto interesante es la constatación de canales que fueron construidos a partir de la ubicación de Caserones en dirección a la PDT con el fin de extender los campos de cultivos hacia estas planicies (Bernard y Dooley, 2017).

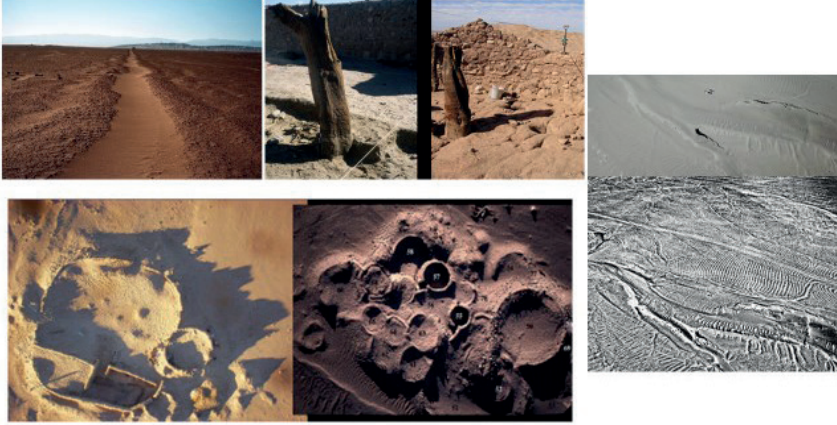


Figura 4. Complejo aldeano Ramaditas: A: canal principal de irrigacion, B: postes de tamarugos como soportes de techumbres. C: Vista aerea de campos de cultivos, D: Conjunto arquitectonico complejo 1, E: Conjunto arquitectonico complejo 3 (fotografías: M.A. Rivera y L. Pérez R.).

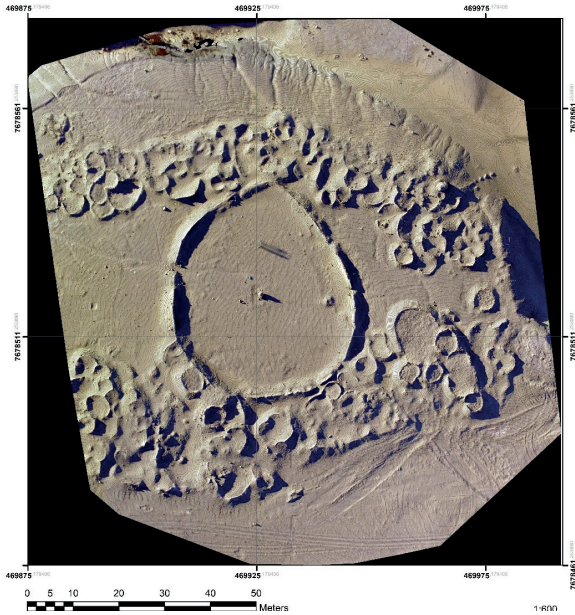


Figura 5. Vista aérea sitio aldea G-1, Quebrada de Guatacondo, Llamara (Fotografía: L. Pérez R.).

Esto habría ocurrido poco después de una megasequía hacia el 3,5 ka AP (Tully *et al.*, 2019). En este período se observa una mayor disponibilidad de agua que la actual debido a la mayor variabilidad del fenómeno de El Niño con mayor presencia de su fase fría (Olson *et al.*, 2019). Luego le siguió, hacia el 1,8 ka AP, un período más seco que obligó a desplazar las ocupaciones de Ramaditas hacia el interior (Rivera, 2005). En este sentido, Tully *et al.* (2019) hacen referencia al cambio cultural que produjeron los períodos secos en el entorno del río San Salvador en la cuenca de Calama (~450 km al sur de la PDT), indicando que la sostenibilidad del sistema agrícola se habría visto afectada por la reducción de la descarga de arroyos como consecuencia de las condiciones de sequía sostenida. Estos autores señalan que posteriormente, las megasequías de 1,3 ka AP y 0,5 ka AP, se correlacionan con fuertes disminuciones en las poblaciones del interior y el abandono de numerosos sitios arqueológicos.

3.4 El Modelo numérico de flujo de agua subterránea en Pampa del Tamarugal (PDT).

El modelo numérico de flujo subterráneo de la PDT permitió realizar una estimación preliminar de la recarga hidrogeológica que reproduce el perímetro de los paleohumedales pleistocénicos que se desarrollaron en los salares de Pintados y Bellavista.

Se determinó que la recarga actual incrementada por un factor de x2 es capaz de recrear los límites de un humedal con el nivel freático <5 m bajo el nivel del terreno y la presencia de probables zonas lagunares en su interior donde el nivel freático estaba en superficie o como máximo a 1 m de profundidad. La superficie total del ecosistema húmedo determinada de esta manera es cercana a 620 km², y su perímetro es coherente con la localización de todos los hallazgos reportados de megafauna pleistocénica en la PDT (Figura 6).

Los resultados de este trabajo sugieren que los paleohumedales de los salares de Pintados y Bellavista identificados previamente por Pfeiffer *et al.* (2018) pudieron formar parte de un solo gran paleohumedal depocéntrico, cuyo perímetro ha podido ser bosquejado con la ayuda del modelo numérico de flujo subterráneo.

El aporte hídrico a este gran paleohumedal debió ser de tipo mixto hipogénico-epigénico con predominio del aporte subterráneo. En ese sentido, cabe destacar que las condiciones paleoclimáticas simuladas son conservadoras ya que, al emplearse de un modelo de flujo subterráneo, solo se enfocaron en modelar el incremento del aporte subterráneo al humedal, y no el mayor aporte de la escorrentía superficial de las quebradas laterales que inundaban el humedal en la temporada de lluvias. Esto permite plantear

la hipótesis de que el perímetro del ecosistema húmedo y las zonas lagunares pudieron ser incluso algo mayores a las estimadas en este trabajo, lo cual debería ser ratificado mediante un modelamiento conjunto de las escorrentías superficiales y subterráneas que incorpore las quebradas laterales.

En cuanto al período de mayor recarga hidrológica del HTa, si bien está demostrado que se tradujo en el escurrimiento de ríos permanentes desde sectores más altos de la PDT (Nester et al., 2007) que marcaron el inicio de una intensificación de la ocupación humana y su agricultura (Rivera, 2005), la ausencia de dataciones de paleoriberas correspondientes al HTa, no permite por ahora validar o descartar si los paleohumedales pleistocénicos y sus áreas lagunares pudieron reactivarse en los períodos húmedos más recientes del HTa.

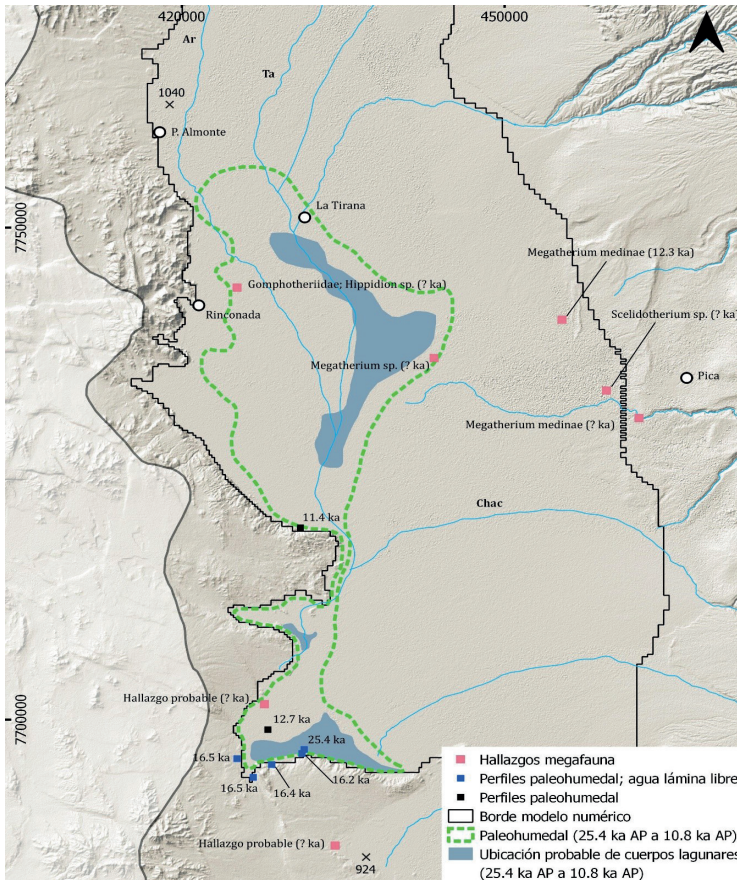


Figura 6. Perímetro del paleohumedal pleistocénico estimado con el modelo y su relación con la ubicación de los hallazgos preliminares de megafauna en PDT y riberas de paleohumedales (elaboración propia).

4. Conclusiones

La información recopilada en el presente trabajo indica que la fase más importante de recarga hidrológica en la PDT aconteció durante el Pleistoceno tardío desde por lo menos ~25,4 ka AP hasta ~10,8 ka AP. Varios milenios después hubo otra fase de menor magnitud en el Holoceno Tardío en el período 3,0 ka a 1,8 ka AP, y un pulso más breve en el lapso 1,0 ka a 0,7 ka AP durante la Anomalía Climática Medieval. Esto explica que las dataciones del agua subterránea almacenada en los acuíferos de la región son en general de una edad >10 ka AP superando los 20 ka y hasta 30 ka AP en el caso de aguas subterráneas profundas.

En las condiciones hidrológicas del Pleistoceno tardío ríos permanentes bajaban de las serranías orientales de la PDT. Se estima que las quebradas Aroma, Tarapacá y Chacarilla desarrollaban cursos de agua que habitualmente llegaban hasta el llano de la PDT mientras que aquellos de las quebradas Jazpampa, Quipisca, Sagasca, Quisma, Ramada y Chipana pudieron tener un régimen estacional y confluir solo algunos meses del año en la planicie con los flujos fluviales permanentes. Estos ríos inundaban recurrentemente la planicie del valle y recargaban el acuífero somero de la PDT, generando las condiciones para el sustento de humedales y cuerpos lagunares permanentes.

Es posible estimar que la extensión y la permanencia en el tiempo de los cuerpos lagunares presentes en estos paleohumedales pleistocénicos debió ser muy sensible a la continuidad del régimen fluvial de los ríos. A causa de la alta demanda evaporativa solo algunos años sin o con pocas lluvias pudieron haber sido suficientes para reducir el tamaño y eventualmente desecar una parte importante de estas lagunas, con consecuencias que habrían sido catastróficas para la megafauna y los humanos que dependían de ellas. Por lo anterior, sería posible plantear que en el Pleistoceno tardío el régimen pluviométrico sobre las montañas que bordean por el oriente a la PDT no solo debió ser más húmedo en promedio que el actual, sino más estable sin intercalaciones de años secos como ocurre con el patrón climático actual. Desde esa perspectiva, de manera muy preliminar se podría plantear que, sobre los 3800 msnm, la magnitud de las lluvias en la zona cordillerana de la PDT en el Pleistoceno Tardío pudo oscilar entre 300-350 mm/año en años secos y al menos entre 400-500 mm/año en años húmedos.

La evidencia hidrogeoquímica e isotópica del agua de lluvia actual y las aguas subterráneas almacenadas en el acuífero de la PDT sugiere que durante las ventanas climáticas húmedas del Pleistoceno tardío pudo haber dos fuentes distintas de vapor de agua, una proveniente del oriente y nororiente amazónico que generaba lluvias isotópicamente ligeras, y otra originada en el Océano Pacífico que producía lluvias más pesadas sobre la cara occidental de la cordillera Los Andes. Esto confirmaría la necesidad de reconsiderar las interpretaciones paleoclimáticas que identifican a la variabilidad de las

fases de ENSO como la principal responsable de contribuir a la variabilidad climática del Desierto de Atacama durante los pasados 20 ka que ya han planteado otros autores (Jordan *et al.*, 2019).

Desde finales del siglo XIX se ha reportado la presencia de osamentas de megafauna en el contexto de la PDT en diversos sectores que tienen como denominador común su cercanía a las orillas de los paleohumedales pleistocénicos donde había agua disponible. Estos hallazgos se concentran en el perímetro de la zona depocéntrica del Salar de Pintados y sectores adyacentes como el área de Pica-Matilla-Esmeralda, pero también al norte cerca de la oficina salitrera Primitiva, y al sur en el entorno de la oficina salitrera Iris en el Salar de Sur Viejo y en la Quebrada de Maní en el Salar de Llamara.

Se han documentado hallazgos de osamentas del género *Gomphotheriidae* entre el antiguo pueblo La Rinconada y el caserío Cabrería, y en la oficina salitrera Primitiva; de *Megatherium sp.* en las cercanías del antiguo pueblo Cumiñalla, en el área de Pica-Matilla, en las cercanías del cerro Longacho, y en la Quebrada de Maní; de *Scelidotherium sp.* en el sector Esmeralda cerca de Pica; y de *Hippidion* entre el pueblo La Rinconada y el caserío Cabrería, y en la Quebrada de Maní.

Los fragmentos óseos de *Megatherium sp.*, *Hippidion sp.* hallados en la Quebrada de Maní fueron datados en 11,8 a 11,2 ka AP, mientras que a los restos casi completos de *Megatherium sp.* encontrado en las cercanías del cerro Longacho se le puede asignar una edad de 12,35 ka AP en base a la datación de restos leñosos ubicados en un sitio cercano a las osamentas. Estas fechas son contemporáneas con la colonización humana de la PDT que data del período 12,8 ka a 9,76 ka AP y coincidentes con la fase final de la ventana climática húmeda del Pleistoceno tardío confirmando que, aunque las condiciones climáticas favorables se habían iniciado con mucha anterioridad, por lo menos ~25,4 ka AP, debieron pasar milenios para el afianzamiento del paleoambiente que fue clave para posibilitar la inmigración y sobrevivencia de la megafauna y de los primeros grupos humanos en habitar la PDT.

Los hallazgos de estos primeros grupos humanos muestran elaboración de herramientas líticas, caza, elaboración de alimentos, y fogones, además de la fabricación de pigmentos y la introducción de conchas de gasterópodos marinos. Además de apreciarse la ejecución de tareas de subsistencia, también se deduce el desarrollo de otras actividades sociales que posiblemente comprenden la decoración corporal, expresiones rituales y artísticas. Los tres sitios tempranos conocidos se ubican en áreas donde existía disponibilidad permanente de fuentes de agua dulce superficial o subterránea somera junto a paleohumedales ribereños o de tipo depocéntricos, siendo muy probable que estos cazadores-recolectores además mantuviesen circuitos locales de desplazamiento durante todo el año para acudir en busca de recursos de un sitio favorable a otro.

Estos grupos humanos que se habían establecido en el entorno de la PDT durante al menos tres milenios aprovechando la fase final de la ventana climática húmeda del Pleistoceno Tardío, debieron enfrentar las consecuencias de un cambio climático hacia condiciones hidroclimáticas más secas y relativamente similares a las actuales que se habría producido a contar del Holoceno Temprano hace unos 9,7 ka AP. Esta “sombra pluviométrica” pudo prolongarse por seis milenios concluyendo alrededor de 3,3 ka AP. En ese período los ríos retrocedieron y dejaron de inundar la llanura de la pampa, y el nivel freático del acuífero se profundizó disminuyendo el aporte hídrico a los humedales ribereños y depocéntricos que se habían consolidado durante el Pleistoceno. Los mayores efectos sobre los grupos humanos tempranos que colonizaron la PDT fueron la reducción en la disponibilidad de agua para la bebida por el alejamiento de los ríos y desecación de lagunas y consecuente disminución de las especies de flora y fauna que constituían su fuente de alimento. En una primera aproximación podría estimarse que un cambio pluviométrico hacia condiciones más secas pudo afectar con relativa rapidez el paleoambiente y a estos primeros grupos humanos, ya que unos pocos años consecutivos con lluvias cordilleranas menores a 300 m/año pudieron ser suficientes para desecar gran parte de estas lagunas, con consecuencias catastróficas para la megafauna y los humanos que dependían de ellas.

Las prolongadas condiciones secas del Holoceno temprano fueron interrumpidas nuevamente por fluctuaciones climáticas que mejoraron periódicamente la intensa aridez en el período ~3,0 ka a ~0,7 ka AP. Estos ciclos climáticos lluviosos del Holoceno tardío fueron menos relevantes que aquellos del Pleistoceno Tardío, pero más húmedos respecto del clima actual. Se presume que los ríos permanentes provenientes de las quebradas volvieron a desembocar en la pampa, pero probablemente sin alcanzar a llegar en forma constante al depocentro de la cuenca como sí ocurrió en el Pleistoceno tardío.

Esta ventana climática favorable coincide con el desarrollo de los primeros establecimientos aldeanos que practicaron una agricultura intensiva a contar de 3,0 ka a 2,5 ka AP, cuando comenzaron a establecerse en las tierras áridas de la PDT y su entorno, grupos humanos que desarrollaron una agricultura de riego con canales que fueron construidos desde el piedemonte en dirección a la PDT con el fin de extender los campos de cultivos hacia esas planicies. Estas aldeas representaron una respuesta eficiente de un modo de vida agromarítimo con una población agrícola y recolectora de tiempo completo, con un énfasis en la explotación del tamarugo, maíz y quinua.

Dentro de este período hubo episodios más secos hacia el 1,8 ka AP que obligó a desplazar las ocupaciones de Ramaditas hacia el interior, indicando que la sostenibilidad del sistema agrícola se habría visto afectada por la reducción de la descarga de los arroyos como consecuencia de las condiciones de sequía sostenida, y otros hacia 1,3 ka y 0,5 ka AP que se correlacionan

con fuertes disminuciones en las poblaciones del interior y el abandono de numerosos sitios arqueológicos.

Simulaciones hidrogeológicas iterativas con diferentes niveles de recarga determinaron que la tasa de recarga hidrogeológica que reproduce un humedal depocéntrico coincidente con las orillas reconocidas e inferidas del paleohumedal pleistocénico es 2,0 veces mayor que la recarga actual de la PDT. Esta modelación permitió acotar preliminarmente el rango de 1,5 a 4 veces que previamente habían estimado otros investigadores.

Además, las simulaciones sugieren que al interior de este gran humedal pudo haber varios sectores con presencia de cuerpos lagunares permanentes, y no solo la zona con agua en lámina libre identificadas en el Salar de Bellavista por Pfeiffer *et al.* (2018). Estas zonas estarían alineadas en la PDT sobre el cauce del río Tarapacá —hoy casi imperceptible— desde la localidad de La Tirana, pasando por Cumiñalla y Pintados y llegando hasta el Salar de Bellavista, por lo menos.

Los resultados de este trabajo muestran que los paleohumedales de los salares de Pintados y Bellavista identificados por Pfeiffer *et al.* (2018) pudieron formar parte de un solo gran paleohumedal depocéntrico de aproximadamente 620 km² cuyo perímetro fue bosquejado con la ayuda del modelo numérico de flujo subterráneo, el cual resulta coherente con la localización de los hallazgos reportados de megafauna pleistocénica y de las primeras ocupaciones humanas. Complementariamente a la existencia de estos humedales, la presencia de un extenso bosque freatófito de tamarugos (*Prosopis sp.*) como parte del paleoambiente pleistocénico de la PDT, puede haber conformado un hábitat propicio para la sobrevivencia exitosa de la megafauna y los cazadores humanos, al generar corredores habitables que posibilitaban largos desplazamientos hacia otras zonas húmedas ubicadas en zonas más altas o distantes, como por ejemplo La Calera, Pica, e incluso al vecino Salar de Llamara.

Este gran paleohumedal depocéntrico probablemente alcanzó su mayor extensión al finalizar el Pleistoceno tardío, y hacia el Holoceno temprano ya debía estar en declinación, como lo demuestran los valores isotópicos más ligeros medidos en la madera de árboles antiguos de esa época cuyos valores de hecho son similares a los que presenta la madera moderna. Se confirma de este modo al Pleistoceno Tardío como la época de establecimiento de la megafauna y de las primeras ocupaciones humanas en la PDT. En la Figura 7 se representa una imagen integradora del paleoambiente de la PDT durante el Pleistoceno tardío incluyendo los hallazgos de megafauna y de las primeras ocupaciones humanas.

Los datos isotópicos de la madera de tamarugos y de la vegetación de las paleoriberas de las quebradas laterales, sugieren que este paleohumedal depocéntrico también pudo reactivarse parcialmente en los períodos húmedos más recientes del Holoceno Tardío (3,5 ka-1,8 ka AP) alcanzando

una extensión menor, aunque hasta ahora no se han identificado paleoriberas asociadas a esa época en la zona de Pintados o Bellavista.

En este sentido, si se lograsen identificar paleoriberas asociadas al Holoceno Tardío entonces también se podría realizar una estimación de la recarga que existía 2,5 ka AP, momento clave en el desarrollo de los primeros establecimientos aldeanos que practicaron una agricultura intensiva en la PDT. El presente trabajo abre valiosas líneas de investigación sobre

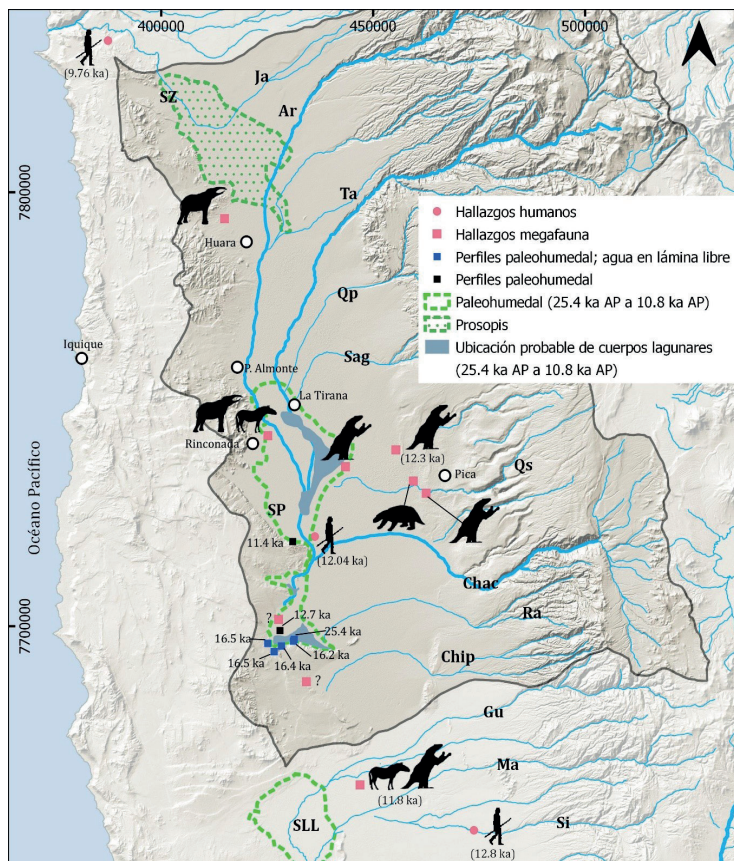


Figura 7. Representación de los paleohumedales del Pleistoceno Tardío en la PDT incluyendo el inventario de hallazgos de megafauna (*Gomphotheriidae*, *Hippidion*, *Megatherium medinae*, *Scelidotherium chilense*) y de las primeras ocupaciones humanas. Extensión del paleohumedal de Pintados-Bellavista según este trabajo; extensión de la zona de Prosopis de Zapiga y del paleohumedal de Llamara según Pfeiffer *et al.* (2018) (elaboración propia).

la adaptación del hombre al clima cambiante del pasado, que resultarán de incalculable utilidad para afrontar los desafíos climáticos del futuro, especialmente considerando que las simulaciones hidrogeológicas indican preliminarmente que cambios no tan radicales en el patrón de lluvias fueron capaces de provocar cambios trascendentes en los ecosistemas húmedos de la PDT. En efecto, la realización de un trabajo exhaustivo de modelamiento paleoclimático de la PDT y su integración con el conocimiento paleontológico y arqueológico de la zona constituye una tarea futura fundamental en esta área aún poco investigada.

Agradecimientos

Agradecemos a Pablo Cañarte por su valiosa recopilación de antecedentes paleontológicos de la PDT, así como por las inspiradoras discusiones en las etapas tempranas de este trabajo. También agradecemos a José Bustamante por su contribución en el ajuste y ejecución del modelo numérico de flujo subterráneo y a Lino Lizarde por la elaboración del SIG del proyecto y figuras. A National Endowment for the Humanities (NEH), Grant FT 285682 a Mario A. Rivera. A la doctora Laura Vitoria se le agradece por las revisiones del manuscrito y sus generosos comentarios que ayudaron a mejorar la versión final.

Referencias

- Acosta O. (2005). Intensive use of aquifers by mining activity in Northern Chile. Groundwater Intensive Use. In A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina, y X. Sánchez-Vila. (Eds.), International Association of Hydrogeologists Selected Papers. 177-185.
- Acosta, O. (2021). Revisión del concepto de sustentabilidad de la explotación de aguas subterráneas en el contexto normativo chileno. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, Número Especial, (2), 57-74.
- Acosta, O. y E. Custodio (2008). Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1), 33-50.
- Acosta, O., J. Guimera, E. Custodio, I. Ansón, J. L. Delgado (2013). Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intrandinas del N de Chile, Agua Subterránea Recurso Estratégico. En N., González, E., Kruse, M., Trovatto y P. Laurencena (Eds.), Tomo I, 118-125.
- Alvarado R., C. Véjar, R. Izaurieta y M. Uribe (2021). Más allá de las Aldeas: Nuevas Evidencias de Complejidad Social en la Pampa del Tamarugal durante el Período Formativo (749 a.C.-996 d.C.). *Boletín de la Sociedad Chilena de Arqueología*. Número Especial, 47-70.
- Amundson, R. W. Dietrich, D. Bellugi, S. Ewing, K. Nishiizumi, G. Chong, J. Owen, R. Finkel, A. Heimsath, y B. Stewart (2012). Geomorphologic evidence for the late Pliocene

- onset of hyperaridity in the Atacama Desert. *Geological Society of America Bulletin* 124 (7-8), 1048-1070.
- Aravena, R., O. Suzuki, H. Peña, A. Pollastri, H. Fuenzalida, y A. Grilli (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. *Applied Geochemistry*, 14, 411-422.
- Basadre M. (1876). *Riquezas peruanas: colección de artículos descriptivos escritos para La Tribuna*. Editorial del Cardo [2003].
- Bernard, H. y A. Dooley (2017). An Ancient Irrigation Canal in the Pampa Tamarugal (Chile). *Journal of Field Archaeology*, 42 (4), 259-268, <https://www.doi.org/10.1080/00934690.2017.1338117>
- Billinghamurst, G. (1886). *Estudio sobre la geografía de Tarapacá*. Imprenta de El Progreso. Santiago, Chile, 120 pp.
- Blanco N., P. Vázquez, F. Sepúlveda, A. Tomlinson, A. Quezada, y M. Ladino (2012). Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la cordillera de la costa, depresión central y precordillera de la región de Tarapacá (20°-21°S). Informe registrado IR-12-50. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Chile, 228 pp.
- Casamiquela, R. M. (1969). Enumeración crítica de los mamíferos continentales pleistocenos de Chile. *Rehue*, 2, 143-172.
- Casamiquela, R. M. (1972). Catalogación crítica de algunos vertebrados fósiles chilenos. II. *Los mastodontes*. *Ameghiniana*, 9 (3), 193-208, 13 figs.
- Casamiquela R. y Sepúlveda F. (1974). Catalogación crítica de algunos vertebrados fósiles chilenos. III. Los megaterioideos. Sobre *Megatherium medinae*. *Philippi. Ameghiniana*, 11 (2), 97-123.
- DGA (2017). Investigación de acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga en la zona norte. S.I.T. N° 418. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, p. 277. Elaborado por Hídrica Consultores SPA.
- Ehleringer J., H. A. Mooney, P. W. Rundel, R. D. Evans, B. Palma, J. Delatorre (1992). Water and nitrogen dynamics in an arid woodland. *Nature*, 359, 316-318.
- Frassinetti D. (1982). *Bibliografía escogida y comentada sobre mamíferos fósiles de Chile*. Museo de Historia Natural, Chile.
- Frassinetti, D.; M. T. Alberdi (2000). Revisión y estudio de los restos fósiles de mastodontes de Chile (*Gomphotheriidae*): *Cuvieronius hyodon*, Pleistoceno superior. *Estudios Geológicos*, 56, 3-4.
- Frassinetti, D. y M.T. Alberdi (2001). Los macromamíferos continentales del Pleistoceno superior de Chile: Reseña histórica, localidades, restos fósiles, especies y dataciones conocidas. *Estudios Geológicos*, 57, 53-69
- Gayo, E. M., C. Latorre, T. E. Jordan, P. L. Nester, S. A. Estay, K. F. Ojeda, C. M. Santoro (2012). Late Quaternary hydrological and ecological changes in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (~21 °S). *Earth Science Review*, 113 (3-4), 120-140.
- Herrera, K, J. Pelegrin, E. Gayo, C. Santoro (2019). Circulation of Objects and Raw Material in the Atacama Desert, Northern Chile by the End of the Pleistocene. *PaleoAmerica*, 5 (4), 335-348.

- Houston J. and A. Hartley (2003). The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal Climatology*, 23, 1453-1464.
- JICA (1993). The study on the development of water resources in Northern Chile. Elaborado por Pacific Consultants International.
- Jordan, T. E., C. Herrera, L. V. Godfrey, S. Colucci, C. Gamboa, J. Urrutia, G. Gonzalez, J. Paul, (2019). Isotopic characteristics and paleoclimate implications of the extreme precipitation event of March 2015 in northern Chile. *Andean Geology* 46 (1), 1-31
- Johnson, E., J. Yáñez, C. Ortiz y J. Muñoz (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(4), 624-635.
- Latcham, R. (1929). Los mastodontes chilenos. *Revista Educación*, 6, 423-432.
- Latorre, C, C. Santoro, P. Ugalde, E. Gayo, D. Osorio, C. Salas-Egana, R. De Pol-Holz, D. Joly, J.A. Rech (2013). Late Pleistocene human occupation of the hyperarid core in the Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary Science Review*, 77, 19-30.
- Magaritz, M., R. Aravena, H. Peña, O. Suzuki and A. Grilli (1990). Source of ground water in the deserts of Northern Chile: evidence of deep circulation of ground water from the Andes. *Ground Water*, 28 (4).
- McDonald, M. G. y A. W. Harbaugh (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 83-875, 528 pp.
- Mooney H. A., S. L. Gulmon, P. W. Rundel, J. R. Ehleringer (1980). Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 44, 177-180.
- Nester, P. L., E. Gayo, C. Latorre, T.E.Jordan, N. Blanco (2007). Perennial stream discharge in the hyperarid Atacama Desert of northern Chile during the latest Pleistocene. *Proceedings National Academy of Sciences*, 104, 19724-19729.
- Oliver Schneider, C. (1926). Lista preliminar de los mamíferos marinos fósiles de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 30, 144-156.
- Olson, E., J. Dodd, M. A. Rivera (2019). *Prosopis* sp. Tree-ring oxygen and carbon records of regional-scale hydroclimate variability during the last 9500 years in the Atacama Desert. *Palaeo* 538. 15 pp.
- Pfeiffer, M., C. Latorre, C. M. Santoro, E. Gayo, R. Rojas, M. L. Carrevedo, V. B. McRostie, K. M. Finstad, A. Heimsath, M. C. Jungers, R. De Pol-Holz, R. Amundson (2018). Chronology, stratigraphy and hydrological modelling of extensive wetlands and paleolakes in the hyperarid core of the Atacama Desert during the late quaternary. *Quaternary Science. Review* 197, 224-245.
- Philippi, R. A. (1892-1893). Noticias preliminares sobre los huesos fósiles de Ulloma. *Anales Universidad de Chile*, 82, 499-506.
- Rivera, M. A. (2005). *Arqueología del Desierto de Atacama. La Etapa Formativa en el Área de Ramaditas/Guatacondo*. Ediciones UB, LOM, Santiago.
- Romero H., M. Méndez y P. Smith (2012). Mining development and environmental injustices in The Atacama Desert (Northern Chile). *Environmental Justice*, 5 (12), 70-76.

- Romero H., P. Smith, M. Mendonga y M. Méndez (2013). Macro y mesoclimas del altiplano andino y desierto de Atacama: desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad. *Revista Geografía Norte Grande* (55).
- Tomlinson, A., N. Blanco, U. Ladino y A. Marco (2015). Carta Mamiña, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, vol. 1.
- Tully, Craig D. J. A. Rech, T. R. Workmana, C. M. Santoro, J. M. Capriles, E. M. Gayo, C. Latorre (2019). In-stream wetland deposits, megadroughts, and cultural change in the northern Atacama Desert, Chile. *Quaternary Research* 91, 63-80.
- Uribe M., C. Agüero, D. Catalán, M.J. Herrera, F. Santana-Sagredo (2015). Nuevos fechados del sitio Tarapacá-40: Recientes análisis y reflexiones sobre un cementerio clave del período Formativo del norte de Chile y Andes Centro Sur. Ñawpa Pacha, *Journal of Andean Archeology*, 35 (1), 57-89.
- Uribe M., S. Urbina y E. Vidal (2020). Arqueología y complejidad social en la Pampa del Tamarugal: revisando los asentamientos del período Formativo de Tarapacá, norte de Chile. Iguales pero diferentes: trayectorias históricas prehispánicas en el Cono Sur. Editores Lorena Sanhueza, Andrés Troncoso y Roberto Campbell. 1ª ed. Santiago: Social-Ediciones, 244 p.
- Vásquez J.(2011). Oficina Alianza 1899. Columna del historiador Juan Vásquez Trigo en la *Tell Magazine*. Marzo.