



# Estructura estratigráfica y origen de paleocostas de la Pampa de Mejillones en el norte de Chile

Ian del Río <sup>a, b, \*</sup>, Gabriel González <sup>a, b</sup>, José Luis Antinao <sup>c</sup>, Eric McDonald <sup>c</sup>, Juan González <sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile

<sup>b</sup> Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales, CONICYT/FONDAP/1511007, Santiago, Chile

<sup>c</sup> Division of Earth and Ecosystem Sciences, Desert Research Institute, 2215 Raggio Parkway, Reno, Nevada 89512, USA

\* email: [idelrio@alumnos.ucn.cl](mailto:idelrio@alumnos.ucn.cl)

**Resumen.** En la Pampa Mejillones, en la península homónima, se observa un conjunto de líneas de paleocosta cuyo origen está ligado a un efecto de alzamiento de superficie y/o una caída del nivel relativo del mar. La presencia de paleocostas en una zona de alta actividad sísmica sugiere que el mecanismo de abandono podría ser producido por alzamiento cosísmico durante grandes terremotos de subducción. Para determinar el origen y mecanismo de abandono de estas paleocostas se hicieron cinco trincheras. El objetivo principal de la excavación fue exponer la estratigrafía interna de la paleocostas y acceder a niveles estratigráficos datables. Cada trinchera fue mapeada estratigráficamente y muestreada para obtener edades mediante luminiscencia por estimulación óptica (OSL). En general, la estructura estratigráfica muestra una sucesión compuesta por un depósito de clastos redondeados sobre depósitos de arena con fósiles de moluscos en distintos estados de conservación. Hemos interpretado estos depósitos como una secuencia de playa (shoreface-foreshore). Los rasgos geomorfológicos, así como las estructuras y características estratigráficas de los depósitos descritos en las trincheras descartan tormentas o tsunamis como procesos generadores. En este trabajo proponemos el ascenso súbito de la superficie debido a terremotos de subducción como principal agente de formación de las paleocostas.

**Palabras Claves:** Paleocostas, Cuaternario, Paleosismología, Terremotos, Península de Mejillones.

## 1 Introducción

La Pampa Mejillones, situada en la península homónima, es una amplia llanura de 350 km<sup>2</sup> con una pendiente aproximada de 1° hacia el mar. Esta pampa está limitada al norte por el océano Pacífico, al sur por la Cuenca del Tiburón, al este por la Cordillera de la Costa y al oeste por la Falla Mejillones (Fig. 1). Esta falla es de tipo normal y tiene un manto de 65° al este (Cortés et al, 2012). Sobre esta pampa se observan una serie de líneas curvas, cóncavas hacia el mar, que han sido interpretadas como líneas de paleocosta (Ortlieb et al, 1996b; Ortlieb et al, 1996c). Estas líneas de paleocosta se han formado como consecuencia del descenso relativo del nivel del mar y/o alzamiento de la superficie del terreno (Ortlieb, 1993).

Ortlieb et al (1996b, 1996c) dataron mediante diversos

métodos (U/Th, paleontología estratigráfica y aminoestratigrafía) los depósitos que conforman las líneas de paleocosta resultando en edades entre los 125 ka al norte de la Pampa Mejillones (MIS 5) hasta 400 ka (MIS 11) al sur, lo que se traduce en una tasa de alzamiento de 0,24 mm/a. Marquardt et al (2005) determinaron tasas de alzamiento de 0,18 mm/a para las terrazas marinas ubicadas en el norte de la península. Victor et al (2011) dataron fósiles de moluscos y calcularon tasas de alzamiento de 0,5 mm/a para la Pampa Mejillones.

El presente trabajo resume una descripción de la estratigrafía y morfología de las líneas de paleocosta de la Pampa de Mejillones. El análisis geomorfológico y estratigráfico de las líneas de paleocosta proporcionará el conocimiento necesario para determinar los procesos de formación de estos rasgos geomorfológicos y comprender mejor el mecanismo de alzamiento de la Península de Mejillones.

## 2 Métodos y resultados

Las paleocostas de la Pampa Mejillones fueron investigadas mediante la combinación de imágenes satelitales, datos topográficos, trincheras y dataciones obtenidas por OSL.

### 2.1 Mapeo geomorfológico y excavación de trincheras

El mapeo de las paleocostas se realizó utilizando imágenes satelitales de hasta 0,3 m/píxel y campañas de terreno. A partir de la cartografía se seleccionaron las localizaciones ideales para realizar las excavaciones. Se realizaron cinco trincheras: cuatro en crestas de paleocostas y una en una falla que corta a estas líneas de paleocosta. Las trincheras se excavaron con una retroexcavadora, perpendicularmente a las crestas de las paleocostas hasta 1,5 m de profundidad.

### 2.2 Dataciones mediante luminiscencia por estimulación óptica (OSL)

Dado que el depósito que marca topográficamente las paleocostas está compuesto por clastos centimétricos, las muestras para OSL fueron extraídas de los depósitos de arena inferiores a estos niveles de clastos. Mediante esta

metodología se determinará la edad máxima de las paleocostas. El análisis se llevará a cabo en el E. L. Cord Luminescence Laboratory, perteneciente al Desert Research Institute, Reno, E.E.U.U.

### 2.3 Resultados

Las imágenes satelitales muestran que las paleocostas configuran un patrón de líneas cóncavas hacia el oeste atravesadas por un juego de fracturas y fallas de orientación submeridiana. Según la orientación de las paleocostas, estas se pueden organizar en cuatro grupos separados por discordancias visibles por cambios en el rumbo entre grupos de paleocostas: un primer grupo con una orientación semejante a la costa actual; un segundo grupo con rumbo EW, subdividido en dos grupos por una discordancia; y un tercer grupo con rumbo EW y una morfología rectilínea. El punto de mayor relieve de las paleocostas coincide con un cambio de coloración marcado por el afloramiento de los depósitos de paleocosta en contacto con depósitos eólicos.

La estratigrafía general de las paleocostas se puede dividir en cuatro unidades de techo a muro (Fig. 2):

- Unidad 1 (A): depósito de conglomerados de hasta 2 m de espesor formado por clastos redondeados de entre 1 a 10 cm, con alta concentración de conchas intactas de pectínidos (*Argopecten purpuratus*), dispuestas en planos inclinados unos 20° hacia el mar. En algunos casos las dos valvas de los pectínidos se encuentran aún unidas. Los primeros centímetros de esta unidad muestran un suelo parcialmente desarrollado marcado por una coloración rojiza y cantidades variables de clastos fracturados por haloclastía. Estos clastos se pueden encontrar hasta a 20 cm de profundidad mientras que el nivel de coloración rojiza alcanza profundidades variables (< 40 cm).
- Unidad 2 (B): Depósito de entre 1,5 a 2,5 m de espesor compuesto por arena fina a gruesa con laminación paralela. Contiene niveles interestratificados de espesor centimétrico de fragmentos de conchas de bivalvos de abundancia variable. Hacia el sur, en las trincheras de mayor edad, la fauna observada pasa a estar compuesta por bivalvos (*Trachycardium procerum*, *Eurhomalea rufa*, *Tagelus dombeii*) y gasterópodos (*Aeneator fortainei*, *Calyptrea trochiformis*, *Crepidatella dilatata*). Presencia variable de clastos redondeados con diámetros entre 1 a 3 cm.
- Unidad 3 (C): Depósito entre 0,5 a 1 m de espesor con abundantes conchas tanto enteras como fragmentadas de bivalvos y gasterópodos y crustáceos (*balanus*), con niveles arenosos intercalados con laminación cruzada, cuya concavidad se orienta hacia tierra, y cementados por sales.
- Unidad 4 (D): Depósito de 1 m de espesor mínimo compuesto por intercalaciones de arena fina con grava redondeada de entre 1 a 2 cm y niveles más ricos en fragmentos de conchas de gasterópodos, bivalvos.

### 3 Discusión

Las características estratigráficas de estas líneas de paleocosta son consistentes con depósitos formados en una playa dominada por oleaje. Los conglomerados de la Unidad 1 corresponderían a depósitos de bermas de playa formadas por oleaje fuerte. Las arenas con laminación paralela de la Unidad 2 representan un ambiente de playa dominado por oleaje de buen tiempo. La presencia de laminación cruzada con sentido hacia tierra se correspondería con la formación de ripples asimétricos en la zona donde rompe el oleaje, el shoreface inferior. Los estratos con laminación paralela y clastos redondeados se corresponderían con una zona de playa de más alta energía como la zona de batida del oleaje.

En los depósitos analizados en las trincheras, los fósiles encontrados (principalmente pectínidos) están poco fracturados, en algunos casos con las dos valvas juntas en un depósito de clastos redondeados. La presencia de clastos redondeados indicaría un medio de alta energía como el que puede ser de fuerte oleaje, tormenta o tsunami. De este modo los pectínidos serían transportados hacia tierra junto con los clastos donde se depositarían y morirían, manteniéndose las dos valvas unidas. Los depósitos generados por tsunamis se caracterizan por la presencia de laminación paralela, grandes clastos transportados tierra adentro, estructuras de carga e imbricación bidireccional (Morton et al, 2007; Kortekaas y Dawson, 2007). Exceptuando la laminación paralela, ninguno de estos rasgos fue observado en las unidades sedimentarias descritas. La presencia de depósitos de clastos sobre depósitos de arena fina podría indicar un transporte de alta energía hacia tierra. La secuencia superior de un depósito de tsunami (compuesta por arena fina laminada y limo) pudo haber sido eliminada por erosión eólica.

La orientación de las líneas de paleocosta varía latitudinalmente. Esta variación parece estar relacionada con la presencia de unas líneas irregulares distinguibles en la imagen satelital. En terreno, estas líneas presentan un escarpe irregular orientado hacia tierra de hasta 1,5 m de altura. Estas líneas han sido interpretadas como discordancias producidas por el efecto de una entrada brusca del mar al reactivarse la falla Mejillones o como respuesta a un terremoto de subducción. Esta interpretación se basa en la variación de la orientación de las paleocostas, las cuales se orientan NS al sur de la pampa, donde comienza la falla, y NNW-SSE al norte, coincidiendo con el punto de máximo desplazamiento de la falla Mejillones.

Durante un terremoto de subducción se producen variaciones en la altitud de la superficie de la placa superior como respuesta a la liberación de energía contenida en forma de deformación elástica (Hyndman y Wang, 1993). El terremoto de Antofagasta de 1995 (Mw = 8.1) provocó un

desplazamiento positivo en la vertical de hasta 80 cm, mientras que el ocurrido en Constitución en 2010 ( $M_w = 8.8$ ) produjo un alzamiento de la costa de hasta 2 m (e.g. Melnick et al. 2012; Delouis et al, 1998; Ortlieb et al. 1996a). La presencia de un conjunto de paleocostas en una zona de alta actividad sísmica sugiere que han sido generadas como consecuencia del alzamiento tectónico asociado a grandes terremotos de subducción (Nelson y Manley, 1992). Tras el sismo de  $M_w 9.5$  de Valdivia de 1960 fueron observadas líneas de costa abandonadas como consecuencia de un ascenso súbito cosísmico (Plafker y Savage, 1970). El análisis de los datos registrados por GPS durante el cosísmico indica que la Península de Mejillones se alza durante los eventos sísmicos (Delouis et al, 1998). Loveless et al (2010) calcularon que el alzamiento neto en la Península de Mejillones producido como consecuencia de los sismos de 1995, 1998 y 2007 y la deformación postsísmica fue de 50 cm al sur y de 30 cm al norte.

De esta manera, posteriormente a la formación de la playa con dos depósitos bien diferenciados (zona de oleaje y zona de batida) se combinarían los efectos de la falla Mejillones, de los terremotos de subducción y de la subsidencia ocurrida durante periodos intersísmicos entre eventos de subducción, determinando el mecanismo de abandono y alzamiento de la costa.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el FONDECYT n° 1140846 y apoyada por el Proyecto N°15110017 FONDAP 2011 “Centro Nacional de Investigación para la gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN)” y por el programa de Doctorado en Ciencias Mención Geología de la Universidad Católica del Norte (UCN). Agradecemos a Isabel Santibáñez y a Camilo Rojas su ayuda durante la excavación de las trincheras.

## Referencias

- Alves, J-H. G. M. 2006. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modeling*, 11: 98-122.
- Cortés, J.A., González, G., Binnie, S.A., Ruth, R., Freeman, S.P.H.T., Vargas, G. 2012. Paleoseismology of the Mejillones Fault, northern Chile: insights from cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and optically stimulated luminescence determinations. *Tectonics*, 31(2), TC2017.
- Delouis, B., Philip, H., Dorbarth, L., Cisternas, A. 1998. Recent crustal deformation in the Antofagasta Region (northern Chile) and the subduction process. *Geophysical Journal International*, 132: 302-338.
- Hyndman, R. D., Wang, K. 1993. Thermal constraints on the zone of major thrust earthquake failure: The Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98 (B2): 2039-2060.
- Kortekaas, S, Dawson, A. G. 2007. Distinguishing tsunami and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology*, 200: 207-221.
- Loveless, J. P., Pritchard, M. E., Kukowski, N. 2010. Testing mechanisms of subduction zone segmentation and seismogenesis with slip distributions from recent Andean earthquakes. *Tectonophysics*, 495: 15-33.
- Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M., Norambuena, R. 2012. Estimating coseismic coastal uplift with an intertidal mussel: calibration for the Maule Chile earthquake ( $M_w = 8.8$ ). *Quaternary Science Reviews*, 42: 29-42.
- Morton, R. A., Gelfenbaum, G., Jaffe, B. E. 2007. Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200: 184-207
- Nelson, A. R., Manley, W. F. 1992. Holocene coseismic and aseismic uplift of Isla Mocha, South-Central Chile. *Quaternary International*, 15/16, 61-76.
- Ortlieb, L.. (1993). Vertical motions inferred from Pleistocene shoreline elevations in Mejillones Peninsula, northern Chile: some reassessments. II International Symposium on Andean Geodynamics (Oxford, 1993), extended abstract volume, 125-128.
- Ortlieb, L., Barrientos, S., Guzman, N. 1996a. Coseismic coastal uplift and coralline algae record in northern Chile: The 1995 Antofagasta earthquake case. *Quaternary Science Review*, 15(89): 949-960.
- Ortlieb, L., Diaz, A., Guzman, N. 1996b. A warm interglacial episode during oxygen isotope stage 11 in Northern Chile. *Quaternary Science Reviews*, 15: 857-871.
- Ortlieb, L. Goy, J. L., Zazo, C., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Guzman, N., Thiele, R. 1996c. Quaternary morphostratigraphy and vertical deformation in Mejillones Peninsula, Northern Chile. In ISAG, No. 3, 212-214, St. Malo, France.
- Plafker, G., and Savage, J. 1970. Mechanism of the Chilean earthquake of May 21 and 22, 1960: *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 1001-1030.
- Rech, J. A., Currie, B. S., Michalski G., Cowan, A. M. 2006. Neogene climate change and uplift in the Atacama Desert, Chile. *Geology*, 34(9): 761-764.
- Victor, P., Sobiesiak, M., Glodny, J., Nielsen, S. N., Oncken, O. 2011. Long-term persistence of subduction earthquake segment boundaries: Evidence from Mejillones Peninsula, northern Chile. *Journal of Geophysical Research*, 116, B02402.

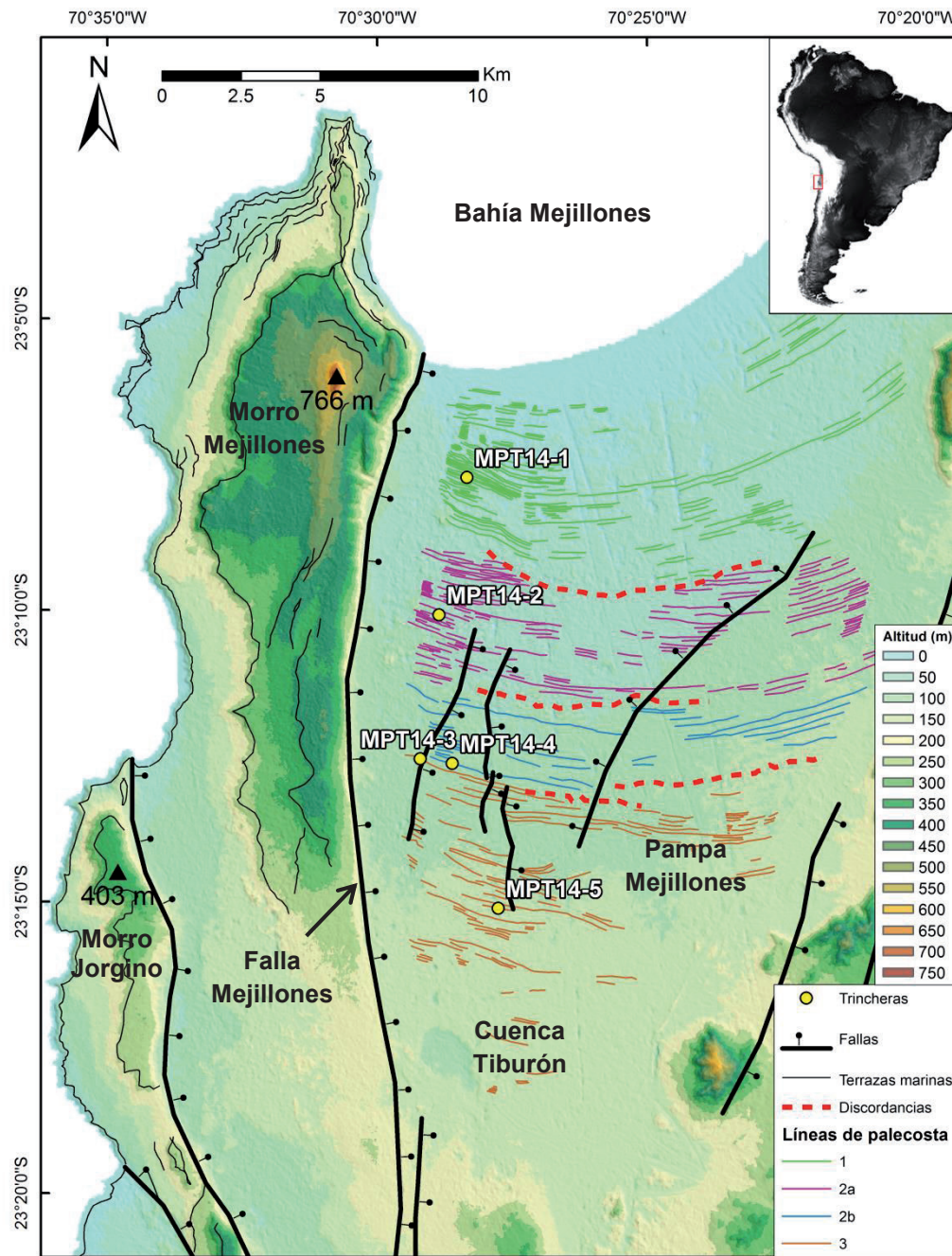


Figura 1. Mapa morfotectónico donde se muestra la localización de las paleocostas y las trincheras realizadas en la Pampa Mejillones.

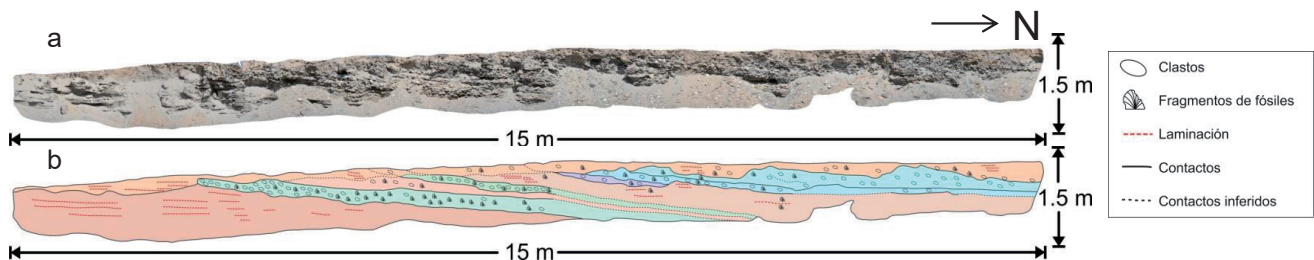


Figura 2. a) Fotomosaico de la pared oeste de la trinchera MPT14-1. b) Interpretación del registro estratigráfico de la pared.