



Retroceso de la barranca del río Paraná en la costa de la ciudad de Diamante, Entre Ríos. Evidencias geomecánicas, controles y evolución temporal del proceso de remoción en masa

Javier SOFFIANTINI¹ y Ernesto BRUNETTO¹

¹LAGEO, Laboratorio de Geología de Llanuras – CICyTTP (CONICET-Prov. de Entre Ríos UADER), Diamante – Entre Ríos

Email: soffiantinij1975@gmail.com

Editor: Edier Vicente Aristizabal Giraldo

Recibido: 23 de agosto de 2022

Aceptado: 28 de febrero de 2023

RESUMEN

La barranca es el rasgo geomorfológico más espectacular del paisaje del río Paraná. Sin embargo, su retroceso por remoción en masa es un permanente peligro para los habitantes del lugar. Sus paredes verticales exponen sedimentos neógenos y cuaternarios con variadas litologías. En muchos casos, los empinados taludes son asociados a la acción erosiva del río que socava la base e induce al colapso de grandes bloques. Particularmente en la ciudad de Diamante, las barrancas se encuentran separadas del cauce principal por una planicie baja y ondulada de 200 a 300 m. Este rasgo supone la existencia de otro mecanismo que induce el retroceso, a partir de la alta movilidad de niveles de arcillas plásticas presentes en la base. El movimiento en masa de octubre de 2018 precipitó el desprendimiento de un enorme bloque, renovando el interés por comprender las causas y los mecanismos que producen remoción en masa y el retroceso de la costa. Nuevos estudios comprendieron la realización de 9 perforaciones geotécnicas, reconocimiento de campo, mediciones geodésicas y análisis de datos geomorfométricos y de alturas del río. Por otro lado, se evidencia una correlación entre una mayor actividad de remoción en masa con un pulso de descenso del nivel del río, ocurrido luego de un intenso periodo de lluvias y crecidas del río Paraná. El aumento en la tasa de retroceso de la barranca en las últimas décadas sugiere una relación con el cambio climático, lo que alude un incremento de la amenaza de remoción en masa en el futuro cercano.

Palabras clave: Geomorfología, remoción en masa, riesgo geológico, cambio climático, expansión lateral

ABSTRACT

Backward Movement of the Paraná River Cliffs, in Diamante, Entre Ríos Province, Argentina.

River cliffs are perhaps the most outstanding geomorphological feature of the Paraná river. Nevertheless, these are a real hazard to people living on the cliffs. In many cases, cliffs are related to fluvial erosion when it removes material from the slope foot. But in Diamante coast, there is a gentle and undulating plain from 200 to 300 m wide, in between the river channel and the cliffs. The presence of this plain refuses the idea of direct river action generating steep slopes. Therefore, it is reasonable to think that other mechanisms can achieve block falls and backward movement of the cliffs. The last landslide in October 2018, which caused the fall and slide of a huge block, renewed the interest to understand the causes that promote it. New data supplied from geotechnical boreholes, geological outcrops, geomorphometric processing, hydrometric level gauge and GPS measurements, allow us to reinforce new ideas about the mechanisms of landslides that induce backward movements of the river cliffs. Both landslides and episodes of fall of the river level within a long-term steady rising, allow us to think that there exists a correlation with the October 2018 landslide event. Thus, it is to be expected that the climate change over the last decades may accelerate rates of falls and backward movements of the cliffs and increase the hazard to people living there.

Keywords: Geomorphology, landslide; geological hazard, climate change, lateral spreads

INTRODUCCIÓN

Las barrancas son quizás el rasgo geomorfológico erosivo más destacado en el sistema fluvial del río Paraná. Se trata de un talud sub-vertical irregular de 10 a 20 m de altura, paralelo al curso del río. Separa las terrazas altas de las zonas bajas y activas del sistema fluvial. La estabilidad vertical de las paredes está fuertemente condicionada por las características litológicas de los sedimentos con una marcada preponderancia de la fracción limo en la composición. Se trata mayormente de limo cementado por carbonato de calcio diseminado o formando cuerpos irregulares denominados tosca, caliche o brosa.

Los procesos de remoción en masa actúan directamente y provocando el desprendimiento y el consiguiente retroceso de las barrancas. Las características estratigráficas y la dinámica fluvial e hidrogeológica, condicionada por las fluctuaciones climáticas y la acción antrópica, son las principales causas de la inestabilidad, haciendo que la gravedad actúe y desencadene el colapso (Cruden y Varnes 1996). Por otro lado, los procesos de remoción en masa son un importante mecanismo de transporte de material sedimentario que facilita la incorporación de los sedimentos al sistema fluvial a medida que se produce el retroceso.

El movimiento en masa en la costa de Diamante fue estudiado desde hace más de cuarenta años (Rivas Rocha 1978, Sanguinetti 1995, Morbidoni et al. 1982, 1984, Fili et al. 2002). El movimiento en masa fue nombrado genéricamente como un deslizamiento aludiendo una cierta equivalencia entre los términos remoción en masa y deslizamiento, si bien los autores atribuían en el movimiento del material la formación de un plano (Sanguinetti 1995, Fili et al. 2002). En este sentido, la traducción literal al español del término *landslide* como sinónimo de remoción en masa indujo a ambigüedades en el uso del término “deslizamiento” como sinónimo de remoción en masa (Ayala 2000). En su correcta acepción la expresión deslizamiento se refiere al tipo de movimiento que desplaza la masa de sedimento o roca por acción de la gravedad (Highland y Bobrowsky 2008). De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) el sentido más restrictivo del término deslizamiento sólo es aplicable para cualquier momento de sedimento (suelo) o roca, donde el material deslizado se separa del material subyacente y estable mediante una zona de debilidad o zona de ruptura.

En el caso de las barrancas de Diamante, con características estratigráficas y estructurales particulares, las observaciones realizadas ponen en duda la presencia de deslizamientos de acuerdo con las definiciones propuestas. Por un

lado, el material sedimentario que constituye la barranca y que es afectado por el proceso de remoción en masa no es homogéneo, sino que se encuentra compuesto por niveles litoestratigráficos bien diferenciados, los cuales le confiere distintos comportamientos geomecánicos frente a variaciones en el campo de esfuerzos. La presencia de heterogeneidades litoestratigráficas no favorecería la formación de fracturas convexas y el desarrollo de deslizamientos rotacionales. Por otro lado, las unidades litoestratigráficas y sus niveles internos, con claros contactos, pero sin la presencia de superficies de estratificación definidas, se encuentran en posición horizontal sin evidencias de estar basculados. Ambas situaciones, estratigráfica y estructural, inhiben la formación de un deslizamiento traslacional a través de la gestación de una superficie de deslizamiento sobre un potencial plano de debilidad.

Por estas razones, los desprendimientos de grandes bloques de la barranca de Diamante estarían impulsados por las características o propiedades intrínsecas de los materiales que constituyen la sección estratigráfica, cuando la misma se encuentra afectada por condiciones de humedad extremas (Cravero et al. 2018), más que a condicionamientos estratigráficos o estructurales. La presencia de materiales muy activos (arcillas plásticas) promovería la generación de condiciones de inestabilidad, con el consiguiente desencadenamiento del proceso de remoción en masa.

La presencia de remoción en masa sobre las barrancas del río Paraná es una verdadera amenaza geológica que genera un alto riesgo humano y económico. Esto condujo hacia finales de la década del setenta a redoblar los esfuerzos para tratar de comprender el fenómeno y los factores causantes que provocan el movimiento en masa con el objetivo de dar una respuesta desde la ingeniería. Desde esta disciplina se diseñaron obras que buscaban mitigar los daños y desactivar el mecanismo rector. Si bien muchos de estos trabajos no fueron publicados en revistas científicas, son una parte importante del aprendizaje adquirido durante los últimos años en relación con los fenómenos de remoción en masa que ocurren en la costa entrerriana del río Paraná. En este sentido cabe mencionar los informes de Rivas Rocha (1978); Sanguinetti (1995) y las síntesis de Morbidoni et al. (1982, 1984) y Fili et al. (2002), que trataron de entender y modelar el proceso de deslizamiento.

Con relación a las causas que promueven la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, el factor climático es uno de los controles principales. En este sentido, está documentado que los grandes ríos de la cuenca del Río de La Plata han incrementado sus regímenes medio desde principios de la década de 1970, como así también se han incrementado

la frecuencia de caudales extremos (Barros et al. 2015). Durante los últimos 50 años existe una tendencia positiva de aumento de las precipitaciones anuales (Doyle y Barros 2011, Barros et al. 2013). Los Índices de intensidad de eventos extremos de precipitación (húmedos y secos) indican que los extremos mensuales húmedos son más frecuentes en la región sur de la cuenca del Río de la Plata desde las últimas décadas del siglo 20 (Cavalcanti et al. 2015). Los eventos extremos húmedos, a su vez, son más frecuentes que los extremos mensuales secos en esta región de la cuenca. En la región del Chaco Austral se han verificado dos períodos de largo plazo diferentes (Lovino et al. 2022). Basados en índices de precipitaciones anuales, los autores identificaron: a) un período seco caracterizado por mayor frecuencia de sequías estacionales, previo a la década de 1960, y b) un período de eventos húmedos de larga duración desde 1960, que parece revertirse desde 2006. Estos autores observaron que la región oriental del Chaco Austral sufre eventos extremos de mayor amplitud. El período húmedo se caracteriza por lluvias pesadas y persistentes, de gran magnitud e intensidad. La mayor severidad de los eventos extremos es controlada por interacciones locales (condiciones sinópticas, humedad del suelo, etc.) y por forzantes de gran escala (interacciones atmosféricas y oceánicas), como así también con el calentamiento global (Cavalcanti et al. 2015). La intensificación de fenómenos extremos ha generado desastres por inundaciones repentinas en grandes ciudades, como así también se reportan cada año inundaciones o deslizamientos de terreno en pequeñas poblaciones (Barros et al. 2015). También se ha documentado la contribución al incremento de los caudales tanto a partir de los cambios en el uso del suelo, además de los incrementos de la precipitación (Doyle y Barros 2011). Los modelos generados para diferentes escenarios proyectan la persistencia de esta tendencia y un incremento en frecuencia y duración de inundaciones en el río Paraná y el río Uruguay (Barros et al. 2013, 2015).

El desprendimiento de un bloque de la barranca en octubre de 2018 renovó el interés ya que la zona afectada se encuentra muy próxima al casco urbano de la ciudad de Diamante (Brunetto y Soffiantini 2018, Soffiantini 2018, Cravero et al. 2018). Cravero et al. (2018) realizaron un estudio basado en observaciones de campo y examen de la documentación antecedente en el cual interpretaron el proceso que desencadenó el evento y propusieron acciones de control y mitigación. Estos antecedentes y la repetición de movimientos menores durante los meses siguientes promovieron la ejecución de un nuevo plan de estudio con el objetivo de proyectar medidas que permitieran neutralizar o mitigar la generación de los deslizamientos. El plan contempló: a) análisis histórico del

retroceso de la barranca, b) relevamiento geológico con el objetivo de ajustar la litología y definir los principales rasgos geomorfológicos, c) ejecución de 9 perforaciones geotécnicas y mediciones de las propiedades geomecánicas, d) relevamiento topográfico con monitoreo de los movimientos del terreno a partir de la medición de puntos fijos y e) correlación con el registro de las alturas hidrométricas del Río Paraná en el puerto de Diamante.

El objetivo del presente trabajo es aportar un modelo de remoción en masa basado en nuevos datos aportados por perforaciones y estudios de campo. Entender el proceso de remoción en masa y su evolución en el tiempo permiten no sólo conocer el mecanismo rector, sino también brinda una herramienta útil para proyectar obras de ingeniería adecuadas y tomar medidas no estructurales que ayuden a mitigar e impedir potenciales daños ocasionados por el movimiento del terreno. Es muy importante sumar nueva información y evaluar el proceso en función de los cambios observados en las tendencias hidroclimáticas en el ambiente del río Paraná, como los cambios y proyecciones de los usos del suelo, tanto en áreas urbanas como rurales.

MARCO GEOLÓGICO

Área de estudio

La localidad de Diamante, ubicada en la provincia de Entre Ríos, donde ocurrió el desprendimiento de un bloque de la barranca en octubre de 2018, se localiza sobre las márgenes del río Paraná, en un sector de su cuenca inferior (Fig. 1). El desprendimiento se produjo en la margen del Barrio San Roque, donde se encuentra el monumento del Cristo Pescador (Lat/Lon: 32°03'58.38" S, 60°38'59.58" W). El desprendimiento principal afectó parte de las instalaciones del Centro Educativo San Roque, destruyendo completamente la calle lindante con el edificio.

El Suroeste de la provincia de Entre Ríos es la región geomorfológica más elevada del Sur de la Mesopotamia. Forma parte de la región denominada Colinas loésicas de Crespo (Iriando 1998). Es un sector elevado que conforma un bloque estructural afectado por intensa acción morfogenética e incisión de los ríos tributarios al río Paraná (Brunetto et al. 2014). A partir de información geodésica y análisis geomorfométricos se ha inferido que el bloque elevado de Crespo ha sufrido suave levantamiento por deformación tectónica, durante el Cuaternario (Brunetto et al. 2019). Las barrancas generadas por la acción erosiva del río Paraná presentan elevaciones entre 40 y 60 msnm. La altura del río en el muelle del Puerto de Diamante está definida en 13.885 msnm y el 0

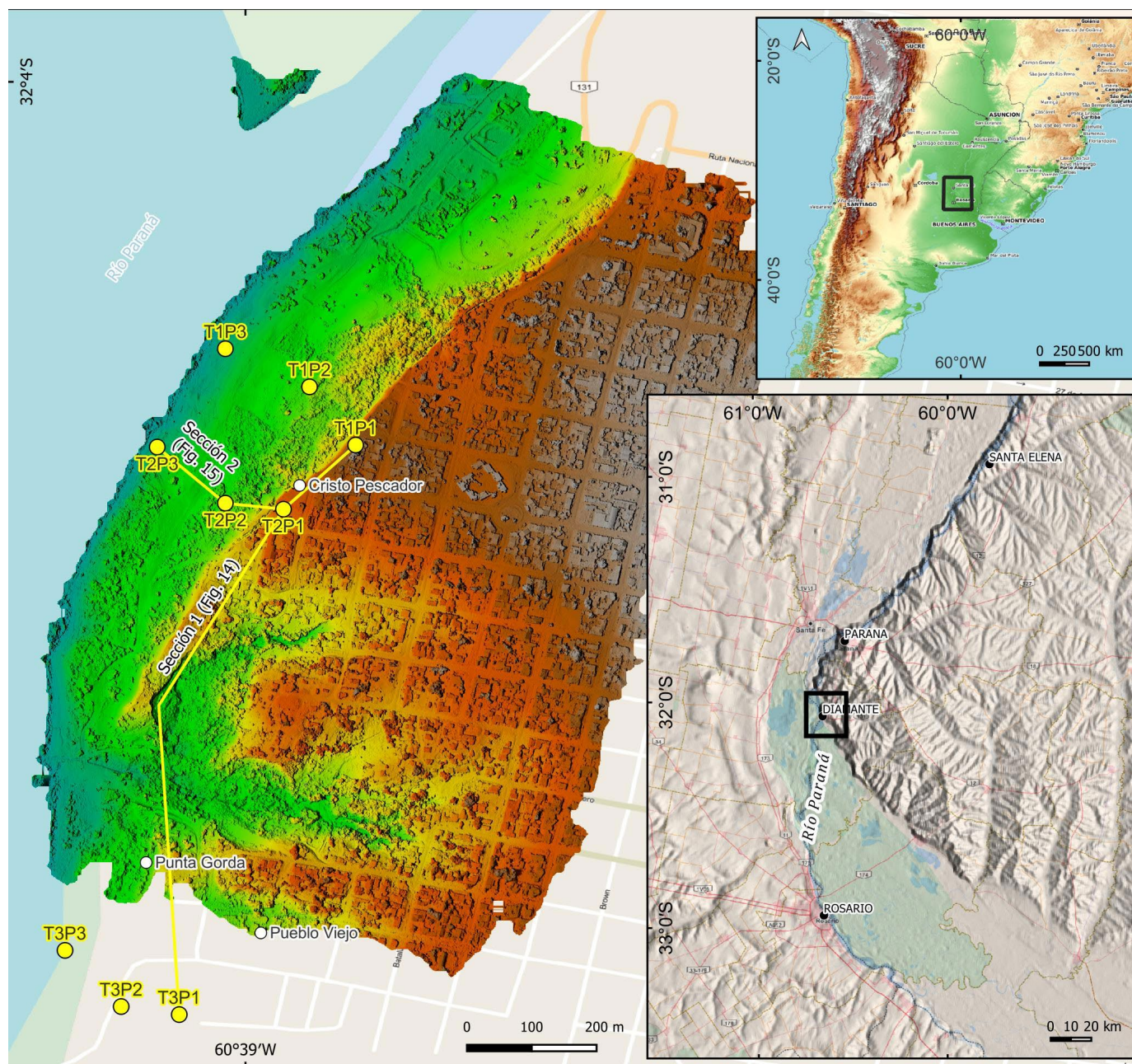


Figura 1. Localización de los deslizamientos y retroceso de barrancas en la ciudad de Diamante, provincia de Entre Ríos, sobre la costa del Río Paraná, sobre un Modelos Digital de Elevaciones de 0.5 m. de resolución (IGN). Los círculos amarillos indican las perforaciones realizadas con fines de estudio de las propiedades geomecánicas. Se indican las secciones geológicas consideradas para el análisis (Figs. 14 y 15).

de la escala en 6.747 msnm (Bulón Hidrométrico BUHJ, IGN). Las barrancas se encuentran separadas del río por una zona baja. Esta plataforma baja es una superficie ondulada, de 200 a 300 m de ancho (Fig. 1), levemente inclinada hacia el río, compuesta por depósitos sedimentarios resultantes de sucesivos desprendimientos o colapsos de la barranca.

Estratigrafía regional del SO de Entre Ríos

Las barrancas exponen en la costa ubicada entre las ciudades de Paraná y Diamante, una sucesión de sedimentos neógenos y cuaternarios integrados por la Formación Paraná

(Mioceno Superior), el Grupo Punta Gorda (Plioceno-Pleistoceno), y las formaciones Salto Ander Egg y Tezanos Pintos del Pleistoceno Tardío (Brunetto et al. 2015, Iriondo 1998). Esta secuencia se expone en canchales y valles fluviales tributarios al Río Paraná. También puede correlacionarse en perforaciones con fines de exploración hidrogeológica (Fig. 2). Aflorando en la base de las barrancas, la Formación Paraná está constituida por sedimentos silicoclásticos con predominio de arenas y pelitas (limos y arcillas), como así también por una alta concentración de sedimentos bioclásticos en sus niveles superiores formados por restos de organismos ma-

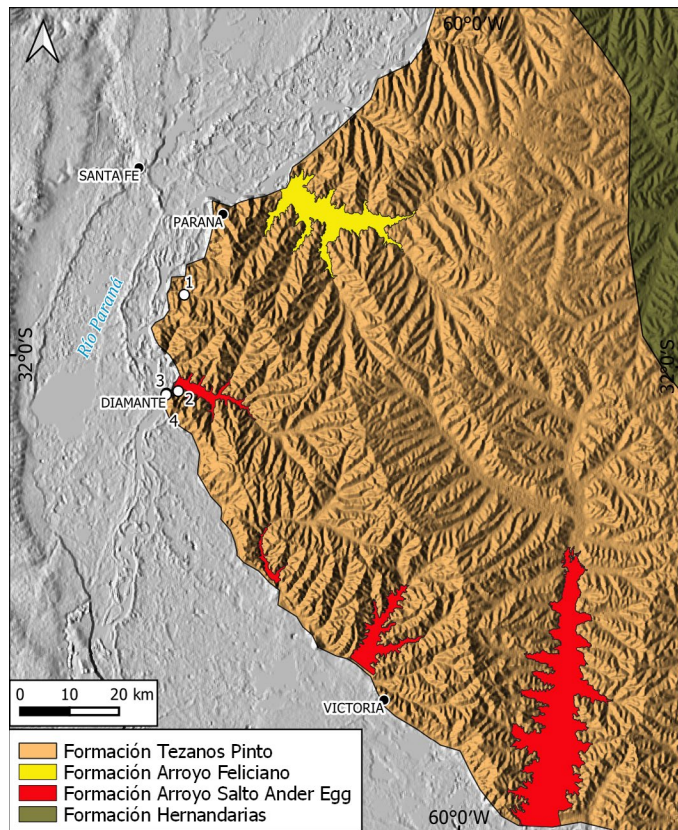


Figura 2. Mapa geológico del suroeste de Entre Ríos. Los círculos blancos representan los sitios de perfiles estratigráficos: 1) Cantera Cristamine; 2) Complejo de termas de Diamante; 3) Cañada de Punta Gorda; 4) Cristo Pescador.

rinós (Pérez 2013). Predominan pelitas verdes, arenas claras, con niveles de arenas blancas y amarillentas. Presenta niveles de arenas bioclásticas cementadas por compuestos carbonáticos, que alojan la mayoría de los restos fósiles (Pérez 2013). Regionalmente los afloramientos de la Formación Paraná muestran en la base una secuencia de arcillas verdes cubiertas por arenas arcillosas a margosas que culminan en bancos de hasta 9 m de espesor, compuestos de calizas oolíticas, masivas y fosilíferas (Aceñolaza 2007). En general, las descripciones de la Formación Paraná, corresponden a los términos sedimentológicamente más heterogéneos (arenas y pelitas) depositados durante las etapas tardías de la ingresión del mar paranaense durante el Mioceno.

En la cantera de Cristamine, al oeste de Aldea Brasileira, Departamento Diamante (Fig. 3a), la Formación Paraná presenta en la base un potente banco (aprox. 10 m) de arenas blancas bien seleccionadas con estratificación diagonal (Aceñolaza 2000). Sobre este depósito se apoya un nivel de arcillas verdes con restos de *Ostrea patagónica* y *Pecten*, de 7 m de espesor. Luego se desarrollan depósitos de arenas arcillosas y arenas margosas gris blanquecinas, sobre el que se apoya un nivel de caliza gris blanquecina homogénea con

restos de moluscos. Por encima se depositaron limos homogéneos y masivos, presentando horizontes pedogenizados de la Formación Punta Gorda y la Formación Tezanos Pinto.

En una perforación realizada en el Complejo termal de Diamante (Fig. 3b) ubicada a 56,8 m.s.n.m, se identificaron arcillas verdes en la base, a 92 m desde la boca de pozo (mbbp). Una secuencia de arena de mediana a fina se depositó entre los 92 y los 46.5 mbbp. Esta sección se expresa en los registros geofísicos con valores mayores de resistividades, los cuales descienden marcadamente en los niveles de intercalaciones de arcillas. Entre los 46.5 mbbp y los 36 mbbp se observa una arcilla de muy baja resistividad. Este nivel aflora en la base de la barranca de Diamante y es de suma importancia en el fenómeno de remoción en masa estudiado en el presente trabajo. Luego se superponen niveles de arenas arcillosas (36-32 mbbp) y arcillas arenosas (32-24 mbbp) que terminan con una intercalación arenosa (24-22 mbbp) y niveles de limos arcillosos con nódulos calcáreos (22-18.5 mbbp). Sobre el techo de la Formación Paraná aparece un banco calcáreo blanquecino con óxido de manganeso entre 18.5 y 16 mbbp. Este depósito corresponde probablemente a la Formación Puerto General Alvear. La columna de la perforación se completa hacia arriba con limos y limos arcillosos pardos rojizos con nódulos de calcáreos cuaternarios (formaciones La Juanita, Punta Gorda y Tezanos Pinto), desde los 16 mbbp hasta la superficie, en la que se desarrolla el suelo actual.

Interpretación de la sucesión de la Formación Paraná

A los efectos de la comprensión del fenómeno gravitacional de la barranca alta del río Paraná en la ciudad de Diamante, es importante destacar el patrón litológico y secuencial vertical de la Formación Paraná. Pueden interpretarse al menos dos últimos ciclos de avances y retrocesos del mar paranaense. Ese patrón se expresa mediante una sucesión granocreciente hacia arriba (arcillas y luego arenas medias a finas) en cada ciclo ascendente de ingresión del mar y posterior regresión. Esta secuencia se registra a través de la información de perforaciones y puede observarse directamente en la cantera Cristamine. La segunda secuencia es evidenciada por la sucesión de arenas arcillosas que pasan a limos con intensos procesos de bioturbación y formación de suelos en ambientes mixtos (marinos litorales-costeros continentales), depositados en ambientes de playa, planicies de mareas y lagunas costeras. Las pelitas (arcillas plásticas) marcan la inundación de las costas y el avance de ambientes de mar adentro. Estos niveles son los responsables de los fenómenos de deformación continua (flujo de materiales). Los miem-

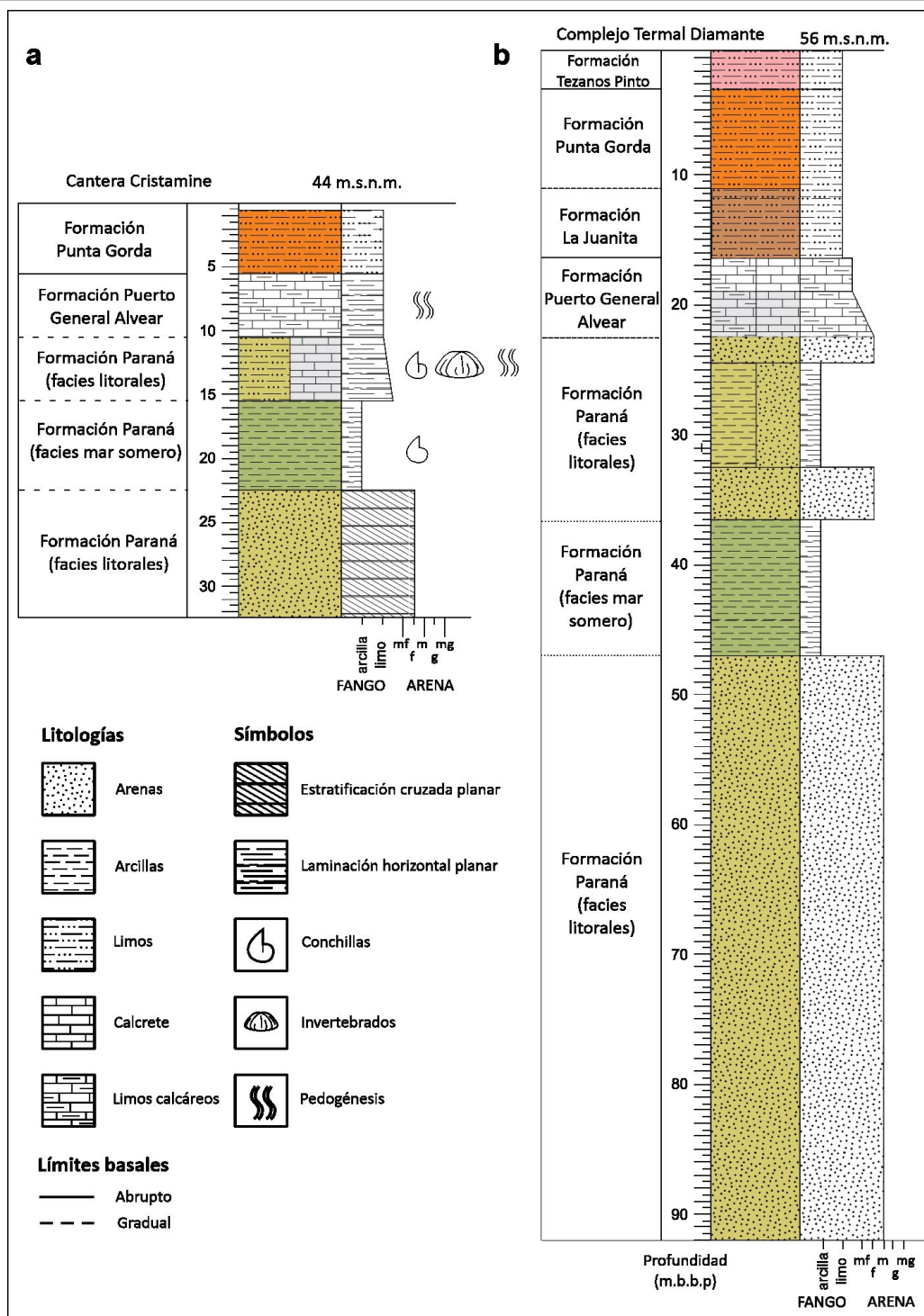


Figura 3. Columnas estratigráficas representativas del Departamento Diamante en el suroeste de Entre Ríos: a) Canteras Cristamine; b) Perforación de exploración en el complejo termal de Diamante.

broso arenoso y heterolítico son los niveles que presentan comportamiento acuífero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder examinar las causas del proceso de remoción en masa que precipitó el desprendimiento de la barranca, se realizó un análisis temporal histórico en gabinete. Se realizó

un relevamiento detallado de campo que incluyó aspectos, estratigráficos, geomorfológicos, topográficos y geodésicos. El análisis de campo permitió, (1) identificar las unidades estratigráficas aflorantes en la barranca, (2) reconocer los principales rasgos geomorfológicos y evidencias del proceso de remoción en masa, y (3) realizar una evaluación cronológica de las estructuras generadas durante el desprendimiento. Por otro lado, las perforaciones permitieron definir y caracterizar

las propiedades intrínsecas de las unidades estratigráficas, a través de datos de granulometría, densidad y resistencia mecánica.

Evolución histórica del retroceso del frente de barrancas en la ciudad de Diamante

Se realizó un mapeo de la costa de Diamante registrando el retroceso del frente de la barranca en distintos momentos históricos. Esta etapa de estudio tuvo como objetivo estimar tasas lineales de retroceso de las barrancas sobre el área urbana de la Ciudad de Diamante. Dada la extensión temporal y frecuencia de la información, fue posible estimar tasas que representan promedios en el tiempo. En el caso de estudio pudieron considerarse los últimos 100 años y establecerse una comparación entre la primera y la segunda mitad de la centuria de registro. Se utilizaron las siguientes fuentes de datos con el fin de documentar la secuencia temporal del cambio de posiciones del frente de barrancas: 1) Carta IGM 1:50000 – Año 1919; 2) Carta IGM 1:50000 – Año 1962; 3) Datos vectoriales de infraestructura urbana IGN (Infraestructura de Datos Espacial del Instituto Geográfico Nacional); 4) Imágenes Digital Globe Google Earth 2018; 5) Modelo Digital de Elevaciones IGN (5m); 6) Modelo Digital de Elevaciones IGN VANT (0.5m). Para realizar el mapeo y a los efectos de la comparación de fuentes de datos diferentes, se georeferenciaron todos los productos cartográficos y proyectaron en el marco de referencia oficial de la República Argentina POSGAR 07 (códigos EPSG: Gauss-Krüger Faja 5, POSGAR 07: 5347). La elevación fue reportada en metros con respecto al elipsoide de referencia.

Estratigrafía: En las proximidades del sitio donde ocurrieron el proceso gravitacional, la cañada que desemboca en el río Paraná en el sector de Punta Gorda se encuentra erosionando fuertemente los terrenos del área del barrio Urquiza, objeto de estudio del presente trabajo (Fig. 1). Esta cárcava representa una incisión de casi 30 m de profundidad, permitiendo observar directamente una extensa parte de la columna estratigráfica del área afectada por el movimiento en masa. Se describió la sucesión de unidades litológicas y sus contactos en secciones a lo largo de casi 300 m, dentro de la pared noroccidental de la cañada. Se describieron texturas, estructuras sedimentarias y elementos arquitecturales. En muestras de arcillas pelíticas de la unidad basal se realizaron análisis mineralógicos de roca total y arcillas por Difracción de Rayos X mediante el difractor PANalytical, modelo X'Pert PRO (CIG-CONICET-UNLP).

Geodesia: Se realizó el relevamiento de alta precisión de 9 puntos fijos (MJ01 a MJ09) mediante técnica de geodesia satelital GNSS doble frecuencia. El mojón MJ08 fue destrui-

do. La localización de cada uno de los mojones es próxima a los sitios donde se realizaron las perforaciones geotécnicas, buscando obtener una distribución similar de la información. Se utilizaron los sistemas de referencia oficiales: Gauss Krüger Faja 5 PosGAR 07 y altimétrico Instituto Geográfico Nacional. Para la vinculación a la red PosGar 2007 se utilizó un equipo GPS Doble frecuencia Trimble para vincular las mediciones locales con un punto de la red geométrica nacional, próximo a la zona afectada por el desprendimiento. Para ello se consideró la base permanente PRNA, ubicada en la ciudad de Paraná, que forma parte de la RED RAMSAC. Además, se realizaron trabajos con el objeto de controlar el movimiento de una red básica de puntos fijos para establecer la velocidad y dirección de los movimientos diferenciales. Se colocó un receptor base en el Centro de Investigaciones del CONICET de la Ciudad de Diamante (CICyTTP), midiendo durante más de 4 horas la posición de los puntos de control. Los puntos MJ01 al MJ09 fueron medidos con dos equipos en cada una de las ubicaciones, registrando datos cada 5 segundos, durante 40 minutos en cada una de ellas.

Geotécnica: En el presente estudio se determinaron parámetros geotécnicos mediante la realización de nueve perforaciones ordenadas en tres transectas (T1, T2 y T3) perpendiculares a la barranca (Figs. 1 y 14). Las perforaciones P1 de cada transecta fueron perforadas en la parte alta de la barranca, a una profundidad de 60 m, de manera de atravesar completamente la columna estratigráfica expuesta en las barrancas. Las perforaciones P2 fueron perforadas a 25 m de profundidad en una posición intermedia de los perfiles, inmediatamente cercana al pie de la barranca. Las perforaciones P3 fueron realizadas a 15 m de profundidad en una posición más distante de la barranca, próximas a la margen del río. Durante la ejecución de las perforaciones se realizó la descripción litológica y la prueba de resistencia o el ensayo de penetración (SPT). En laboratorio se midieron los parámetros geotécnicos de granulometría, humedad natural (HN), límites de consistencia de Atterberg (Límite Plástico, LP; Límite Líquido, LL; e Índice de Plasticidad, IP), Densidades y ensayo triaxial (resistencia y coeficiente de fricción). La determinación de las densidades (húmeda y seca) y humedad natural (HN) fue realizada en base a las relaciones teóricas conocidas (Holtz and Kovacs 1981). El análisis granulométrico fue realizado bajo los estándares de la USCS (*Unified Soil Classifications System*). Las variaciones en profundidad de las propiedades geotécnicas permitieron definir niveles o unidades geotécnicas (UG) útiles para correlacionar los pozos desde el punto de vista geotécnico e interpretar el comportamiento que promueve el proceso de remoción en masa.

RESULTADOS

Evolución histórica del retroceso del frente de barrancas

Se obtuvo un mapa de líneas de frente de barrancas para los años 1919, 1962 y 2018 (Figura 4). Se estimaron tasas máximas lineales de retroceso de 1.20 m/año (120 m en 100 años). Estos valores se calcularon en el sector ubicado 350 m al Norte del Cristo Pescador. En este sector, en el año 1978 ocurrieron los movimientos gravitacionales más severos, afectando al puerto, al ferrocarril y produciendo el daño de viviendas y de la Escuela Nacional N° 211. En el sector frente al puerto actual se estimaron tasas del orden de 1.12 m/año (112 m en 100 años). En el área del Cristo Pescador, el retroceso ha sido del orden de los 50 m (0.50 m/año). En el área de Punta Gorda, retrocesos del orden de 72 m (0.72 m/año); en Pueblo Viejo 106 m (1.06 m/año); en el Brete, hacia el sur de la ciudad, el retroceso alcanzó hasta 65 m (0.65 m/año). En resumen, las tasas de retroceso del frente de barrancas oscilaron en el último siglo en el orden de 0.50 m/a y 1.57 m/año. De la comparación de las líneas del frente barrancas, puede inferirse que la tasa de retroceso aumentó en la segunda mitad del siglo (1962-2018) (Cuadro 1). Esta observación puede correlacionarse de manera general con el incremento demográfico y el incremento de las variables hidrológicas e hidroclimáticas. La expansión de la urbanización puede verificarse en la cartografía IGM e infraestructura de datos IGN. El incremento de las variables hidrológicas e hidroclimáticas han sido documentados ampliamente en la literatura y en registros de instituciones técnicas especializadas del país y la región (Barros et al. 2013, 2015).

Observaciones de campo

Sección estratigráfica en la cañada Punta Gorda (Diamante): Las principales observaciones muestran en la base de la sección, el techo del nivel de arcillas plásticas. Estos sedimentos pelíticos poseen un alto contenido de cuarzo (Q) y minerales de arcillas (Arc) (Anexo 1). Mediante DRX de ar-

cillas, se comprueba que la esmectita (Sm) es el argilomineral dominante, seguido por la presencia de illita (I) e interestratificados con pocas capas expansivas (I/S), con presencia minoritaria de caolinita (K). Este nivel pelítico puede correlacionarse probablemente con el que fue detectado mediante las perforaciones realizadas en el presente estudio y a una profundidad entre 36 y 46 m.b.b.p en la perforación antecedente del complejo termal de Diamante (Fig. 3b), localizada a 2700 m de distancia. Esta unidad litológica tiene un carácter regional (también aparece en la cantera Cristamine, con un espesor de aproximadamente 7 m; (Fig. 3a). En la zona de Diamante aflora en la base de la barranca, conformando la superficie baja entre la barranca y el nivel del río (Fig. 5). Por encima de este estrato se ubican niveles de arenas arcillosas y limos carbonáticos de la Fm. Paraná (Fig. 6) con espesores que oscilan entre 10 y 15 m (Fig. 7). Sobreyace la Fm. Puerto General Alvear (Fig. 6), compuesta por limos laminados formando placas horizontales irregulares. Estos limos constituyen un calcrete muy potente generado por la cementación debido a la precipitación de carbonatos de origen freático. El precipitado carbonático da una coloración blanquecina a los limos. El contacto entre los niveles areno-limosos cuspidales de la Fm. Paraná y la Fm. Puerto General Alvear, no es neto. Las evidencias de los procesos post-sedimentarios de calcritización trasgreden el contacto y afectan al sustrato subyacente del a Fm. Paraná. El estrato de limos calcritizados de la Fm. Puerto General Alvear tiene un espesor de aproximadamente 3 a 4 m en el área analizada (Fig. 7). Sobreyace la Fm. La Juanita (Fig. 6), constituida por limos muy arcillosos, de colores pardos oscuros; presenta laminación difusa sugiriendo que dichos depósitos de pelitas se acumularon en ambientes palustres. Análisis mineralógicos de muestras obtenidas en este sitio, muestran la presencia de arcillas esmectitas (Iriondo y Kröhling 2008). El espesor es de aproximadamente 3 a 4 m en el área analizada (Fig. 7). La Fm. Punta Gorda sucede a la anterior (Fig. 6). Está conformada por limos pardos anaranjados muy compactos, en parte cementados debido a la presencia de niveles de antiguos suelos (paleosuelos),

Cuadro 1. Velocidades de retroceso de la barranca en Diamante

| Sector | Distancia de retroceso (m) (Carta IGM 1919) | Tasa de retroceso (100 años)(m/a) | Distancia de retroceso (m) (Carta IGM 1962) | Tasa de retroceso (56 años) (m/a) |
|-----------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| Puerto actual | 112 | 1,12 | 78 | 1,39 |
| Puerto Nuevo | 120 | 1,2 | 88 | 1,57 |
| Cristo pescador | 52 | 0,52 | 38 | 0,68 |
| Punta Gorda | 72 | 0,72 | | |
| Pueblo Viejo | 106 | 1,06 | 57 | 1,02 |
| El Brete | 65 | 0,65 | 60 | 1,07 |

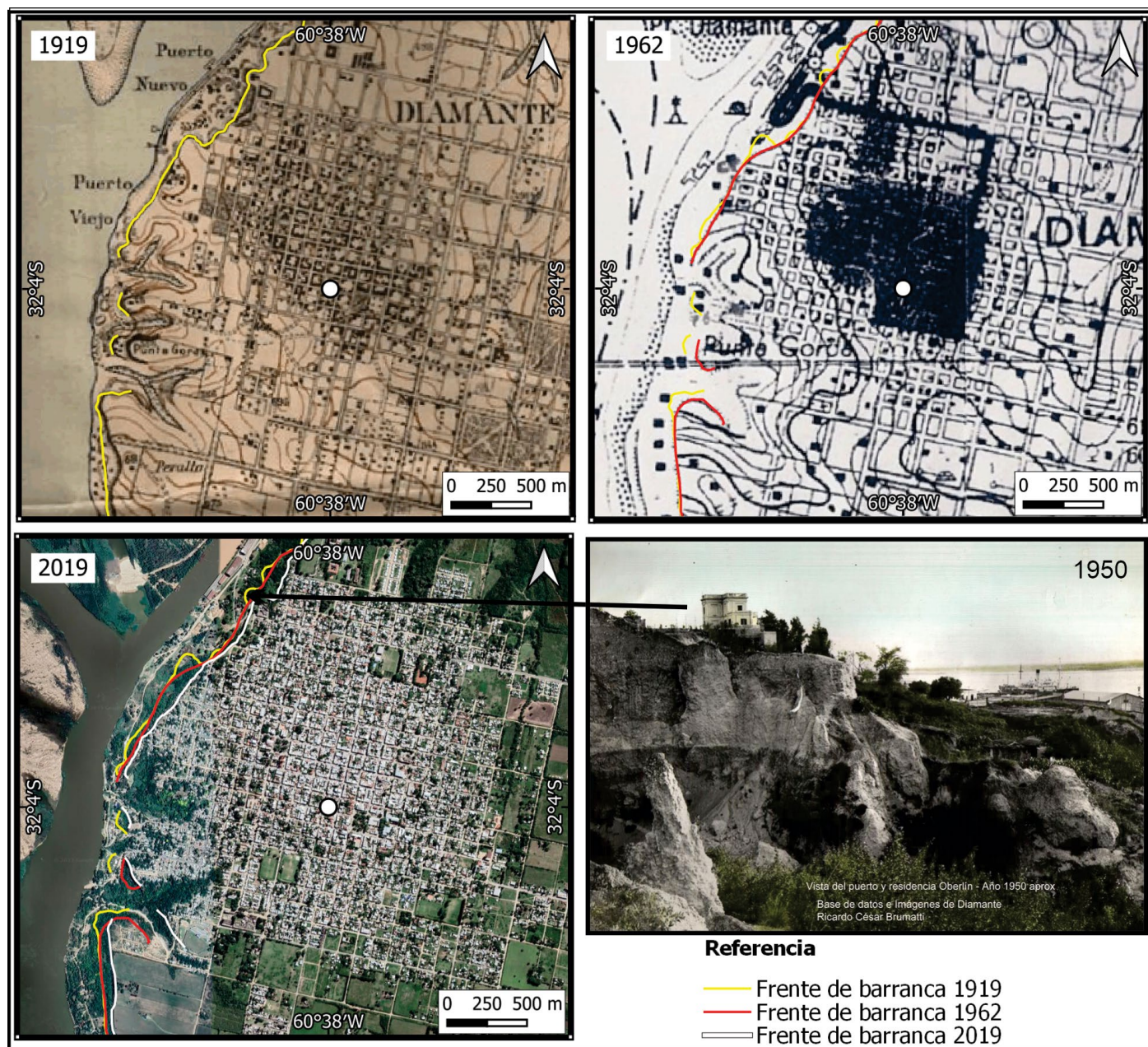


Figura 4. Evolución del retroceso de barrancas en la ciudad de Diamante en 100 años. Nótese que la residencia Oberlin, situada frente al puerto de Diamante fue destruida con la intensificación de los procesos de remoción en masa durante la segunda mitad del siglo 20.

distribuidos en forma de sucesiones de horizontes dentro de la unidad sedimentaria. El espesor es de aproximadamente 5 a 7 m en el área analizada (Fig. 7). Las unidades de la columna superior de limos consolidados y comportamiento elástico-frágil no son lateralmente homogéneas. Presentan zonas de paleocauces incididos y rellenos por materiales mal seleccionados que varían de gravas a arenas y limos. Estas variaciones laterales de la columna superior (formaciones Puerto General Alvear, La Juanita, Punta Gorda y Tezanos Pinto), representan zonas de debilidad y comportamiento hidrogeológico diferencial.

Unidades geomorfológicas: El sector estudiado (Fig. 8), en el cual se ha desarrollado la urbanización de Diamante, presenta colinas con formas elongadas y orientaciones generales N-S (patrones NNO-SSE y NNE-SSO). Forman parte de la unidad regionalmente denominada colinas loésicas de Crespo (Iriando 1998). Las crestas de estas colinas en el sector de Diamante presentan elevaciones entre 60 y 80 msnm. El sistema de colinas muestra laderas (pendientes de colinas) ligeramente asimétricas: longitud de las pendientes 480-550 m y pendientes oscilando entre 1.6° y 4.6°. Las colinas son erosionadas e incididas por cañadas del orden de 300-350 m

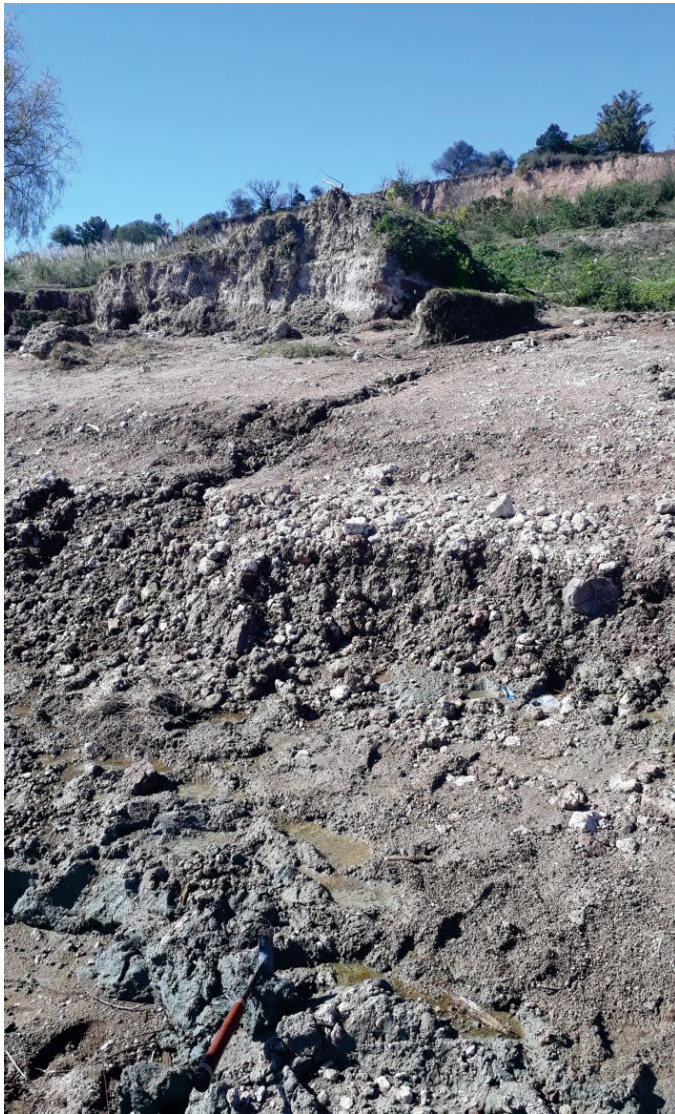


Figura 5. Nivel de arcillas plásticas esmectíticas de las facies marinas de la Fm. Paraná, en el área del Cristo Pescador donde ocurrieron los deslizamientos.

de ancho y hasta 10 m de profundidad, con suaves laderas de 1°- 2° de pendiente. Las cañadas desembocan en el valle del Arroyo Ensenada o en el Río Paraná, incidiendo planicies elevadas, limitadas por barrancas altas, en forma de cárcavas de 30-50 m de ancho y entre 5-10 m de profundidad. Las cárcavas alcanzan los 150-180 m de ancho y profundidades de 15-20 m. Las cárcavas más evolucionadas presentan hasta 270 m de ancho y 35 m de profundidad.

A lo largo de la margen izquierda del Paraná, se observan extensas barrancas altas (bancos de erosión del Río Paraná) (Fig. 9 a). La altura de las barrancas es del orden de 35-40 m sobre el nivel del río. Las pendientes mayores del frente de barranca presentan valores de 40°-50°. Sobre la base, al pie de las barrancas, se desarrolla una superficie irregular que conforma una faja de 150-270 m de ancho caracterizada

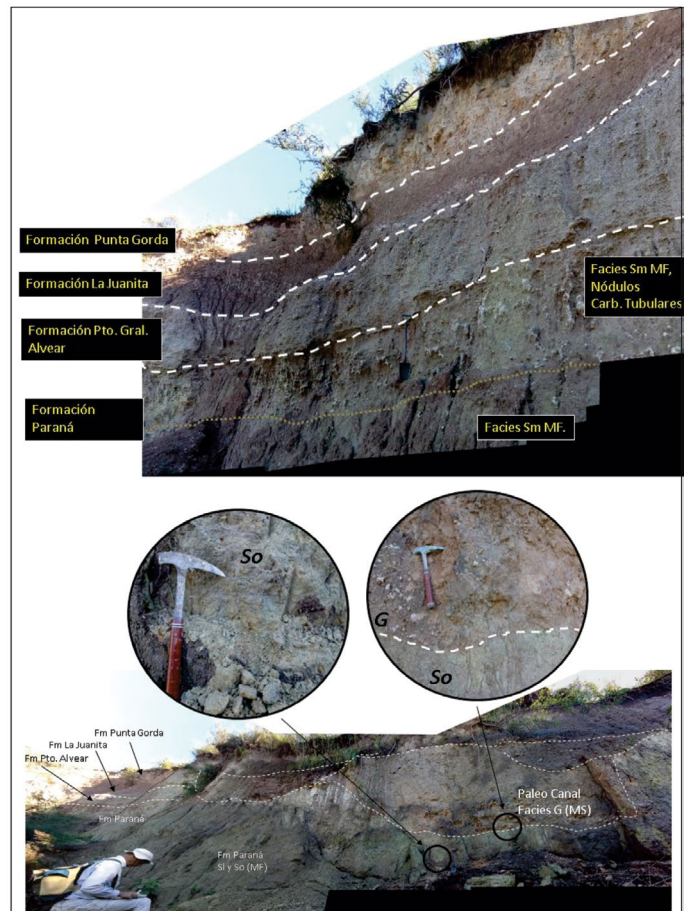


Figura 6. Estratigrafía del área del Cristo Pescador, en la cañada que desemboca en el paraje Punta Gorda.

por geoformas de acumulación, erosión y deformación. Estas geoformas se manifiestan como pequeñas y suaves lomas, con forma elongada dominante, paralelas al frente de la barranca (Fig. 9 a y b). En conjunto, las morfologías resultantes, conforman una planicie ondulada donde las lomas paralelas a la costa son erosionadas por cañadas transversales mayores que drenan el escurrimiento de la zona alta de colinas. La zona baja también es atravesada por cauces menores que canalizan el escurrimiento de áreas locales. La erosión hídrica de la planicie baja por acción de las cañadas y cauces menores genera lomas transversales (Fig. 8 y Fig. 9 c).

Las morfologías superficiales de la planicie baja (Fig. 12) se vinculan con procesos gravitacionales y se desarrollaron a partir de una compleja acumulación y deformación de bloques y materiales provenientes de orígenes diferentes: a) bloques desprendidos y deslizados del frente de barrancas; estos materiales generados en sucesivos episodios de caídas y deslizamientos, rápidamente son erosionados e incorporados al sustrato formando superficies irregulares suaves (Figs. 9 a y 10 d); d) fosas y bloques elongados hundidos generados por colapsos debidos a fallamiento por estiramiento de las capas

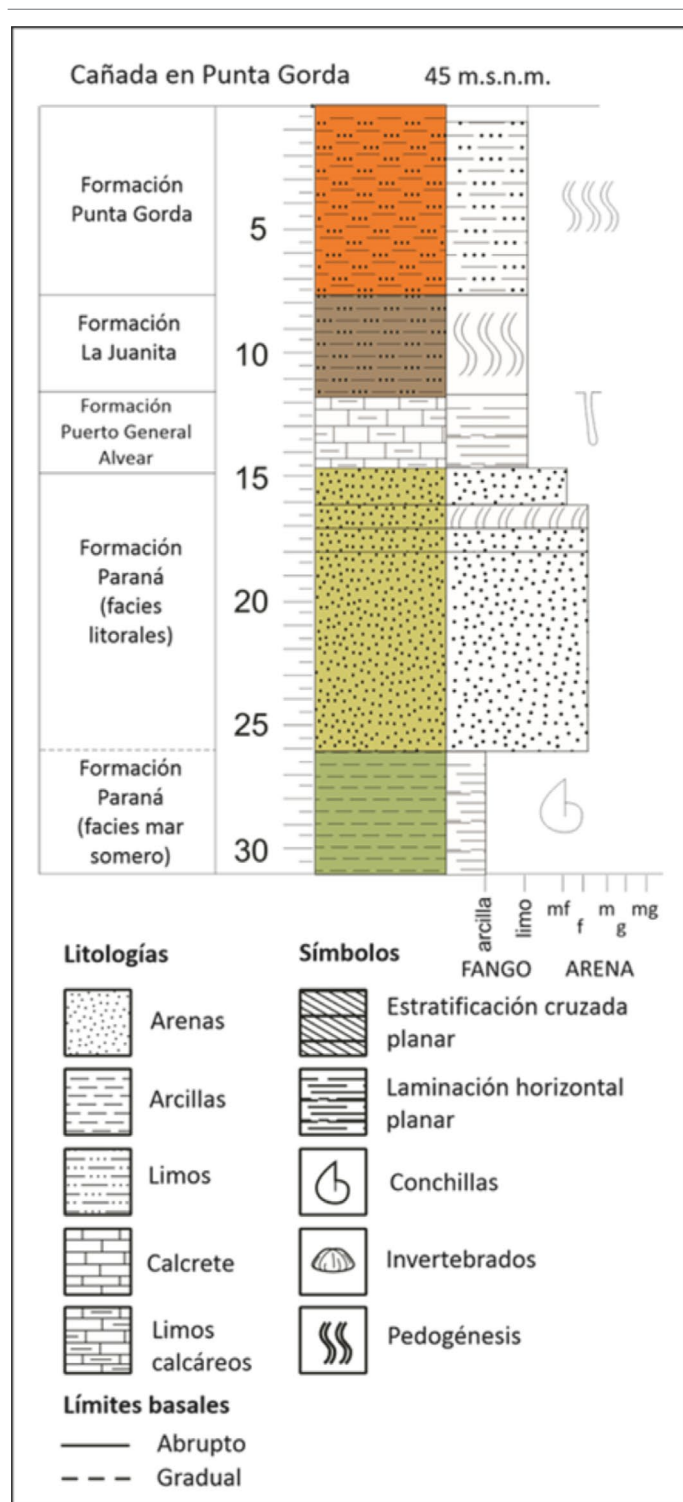


Figura 7. Estratigrafía del área del Cristo Pescador, donde ocurrieron los deslizamientos. En la base pueden observarse las arenas finas arcillosas de la Fm. Paraná (facies de ambientes mixtos). Estas arenas apoyan sobre las arcillas esmectíticas altamente deformables de facies marinas de la Fm. Paraná.

del suelo (Fig. 9 d). Son depresiones estructurales adyacentes al frente de barranca con escarpas del orden de 1 m de altura (Figs. 9 e y f); c) domos elongados: materiales del suelo deformados y flexurados, ascendidos por tensiones y movi-

mientos por diferencias de coherencia y densidades (Figs. 10 d y 11 c); d) escarpas por fallamientos y fracturas asociadas: todos los materiales anteriores presentan localmente series de fallas y desniveles de decenas de centímetros, producidos por la deformación elástico-frágil de la superficie, debido a las tensiones que sufren los materiales (Figs. 10 e y 11 a y b). Las escarpas responden a un patrón de fallamiento directo; e) crestas de presión que conforman geformas elongadas paralelas y próximas al río (Fig. 11 d-f): son materiales deformados por compresiones que producen el cabalgamiento de unos materiales por encima de otros, deslizados sobre superficies de fallas inversas de bajo ángulo (Fig. 11 e);

Análisis cronológico de las fracturas

El análisis cronológico de las fracturas permitió corroborar que con anterioridad a la aparición de la fractura principal (Fig.10 a) y al desprendimiento del bloque en la parte alta de la barranca, se gestó un movimiento de tipo extensional. La deformación de este tipo generó el desarrollo de familias de fallas normales en la zona baja de rumbo OSO-ENE y NO-SE y NNE-SSO. Las fracturas evidenciaron movimientos verticales relativos de 0.30 a 0.50 m (Figs. 10e y 11a). Posteriormente a los movimientos de la zona baja, la fractura principal comenzó lentamente a abrirse en el orden de 1 a 5 cm diarios. Sobre ésta, se inició un inminente movimiento descendente del bloque desprendido, del orden de 10 cm en los primeros 10 días, desacelerándose a escasos centímetros a partir de los 30 días desde iniciado el proceso. El plano de fractura tiene un carácter vertical a subvertical levemente inclinado hacia el río (Fig. 10 a-b). Nuevos desprendimientos de bloques ocurrieron durante los meses siguientes, extendiéndose el área afectada (Fig. 10 c).

Monitoreo geodésico de movimientos en la zona baja

El seguimiento de la posición geodésica de la red básica de puntos fijos para establecer la velocidad y dirección de los movimientos diferenciales de la zona afectada muestra que los desplazamientos en la zona baja continuaron después de 6 meses (Fig.13). Particularmente los desplazamientos mayores se observaron en la zona central y externa de la zona afectada (mojones 3, 4, 5 y 6). Se verificaron desplazamientos del terreno en la unidad de arcillas hacia el ONO de hasta 1.40 y 1.48 m, después de 81 días de mediciones (Cuadro 2), observados en el sector más externo (mojones 3 y 4). En el sector central los desplazamientos fueron de 0.513 y 0.688 m. En todos los casos, los movimientos en la vertical fueron descendentes, medidos entre 6.5 y 20.3 cm en esos puntos de control (Cuadro 2). En el resto de puntos de control, próxi-

mos a la barranca y hacia el sur, los desplazamientos no fueron significativos. Además, se observa una aceleración de los movimientos hacia afuera y hacia el Norte. El monitoreo mostró que los desplazamientos continuaron durante un tiempo prolongado y ratificaron el mecanismo por flujo del material de arcillas y deformación por expansión. Es importante observar que los movimientos del terreno por flujo de arcillas en dirección hacia el río, persistieron después de 10 meses.

PERFIL GEOTÉCNICO

La ubicación de los pozos permite reconstruir dos perfiles geotécnicos, cada uno constituido por tres pozos (Fig. 1). Se

presenta la sección 1 correspondiente a la correlación de las perforaciones que se ubican en la parte alta de la barranca. Está constituido por tres perforaciones que alcanzaron los 60 m de profundidad (Fig. 14). La sección 2 (Fig. 15) se ubica perpendicular a la costa del río, atravesando la barranca a la altura de la plazoleta del Cristo Pescador, lugar donde se desarrolló la fractura principal. El perfil está constituido por tres pozos. El pozo T2P1, de 60 m de profundidad, se ubica en la parte alta y corresponde al pozo intermedio de la sección 1 (Fig. 14). El pozo T2P2 se localiza en la parte media y alcanzó una profundidad de 25 m. Por último, el tercero pozo, el T2P3, se ubica próximo a orilla del río y penetró los primeros 15 m (Figura 15).

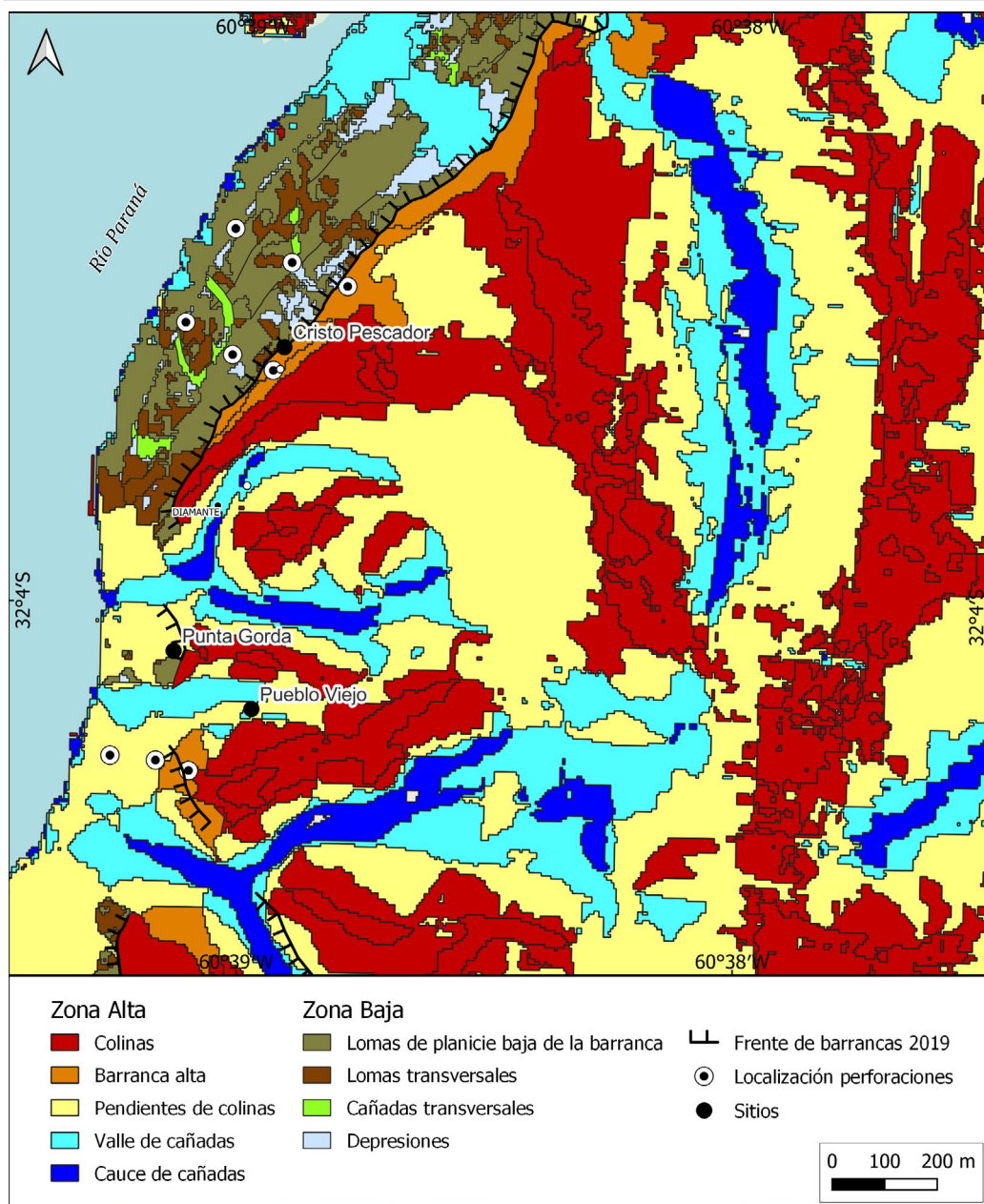


Figura 8. Mapa geomorfológico del área de Diamante, sobre el río Paraná.

Cuadro 2. Desplazamientos de puntos de control

| Coordenadas (m) 7/6/2019 | | | | Coordenadas (m) 27/8/2019 | | | | Desplazamientos (m) en 81 días | | |
|--------------------------|------------|-------|---------|---------------------------|------------|-------|-------|--------------------------------|--------|-------|
| ESTE | NORTE | COTA | | ESTE | NORTE | COTA | | ESTE | NORTE | COTA |
| 5438768.55 | 6452727.27 | 61.59 | MJ-02 | 5438768.56 | 6452727.27 | 61.55 | MJ-02 | -0,01 | 0,007 | 0,039 |
| 5438541.05 | 6451842.64 | 53.8 | MJ-09 | 5438541.06 | 6451842.63 | 53.74 | MJ-09 | -0,01 | 0,009 | 0,059 |
| 5438688.47 | 6452618.18 | 52.91 | MJ-01 | 5438688.46 | 6452618.18 | 52.89 | MJ-01 | 0,004 | 0,005 | 0,016 |
| 5438473.36 | 6451863.7 | 25.78 | MJ-08 | 5438473.31 | 6451863.69 | 25.73 | MJ-08 | 0,053 | 0,01 | 0,055 |
| 5438580.87 | 6452629.68 | 28.41 | MJ-06 | 5438580.36 | 6452629.97 | 28.32 | MJ-06 | 0,513 | -0,291 | 0,088 |
| 5438506.72 | 6452704.21 | 13.03 | MJ-05 | 5438506.03 | 6452704.61 | 12.93 | MJ-05 | 0,688 | -0,404 | 0,103 |
| 5438689.07 | 6452817.27 | 28.92 | MJ-04 | 5438687.67 | 6452818.18 | 28.85 | MJ-04 | 1,4 | -0,908 | 0,065 |
| 5438631.83 | 6452856.41 | 19.08 | MJ-03 I | 5438630.35 | 6452857.21 | 18.88 | MJ-03 | 1,48 | -0,796 | 0,203 |



Figura 9. Morfologías superficiales en el sector afectado por proceso de remoción en masa. (a) Barranca y planicie baja; se observan bloques desprendidos de la barranca alta; (b) loma longitudinal afectada por fracturas paralelas al eje; (c) loma transversal, generada por la erosión de las lomas longitudinales a partir de cañadas y surcos transversales a la planicie baja; (d) depresión estructural adyacente a la barranca, en el pie del talud; e y f) escarpa en la margen externa de la depresión de aproximadamente 1 m de altura.

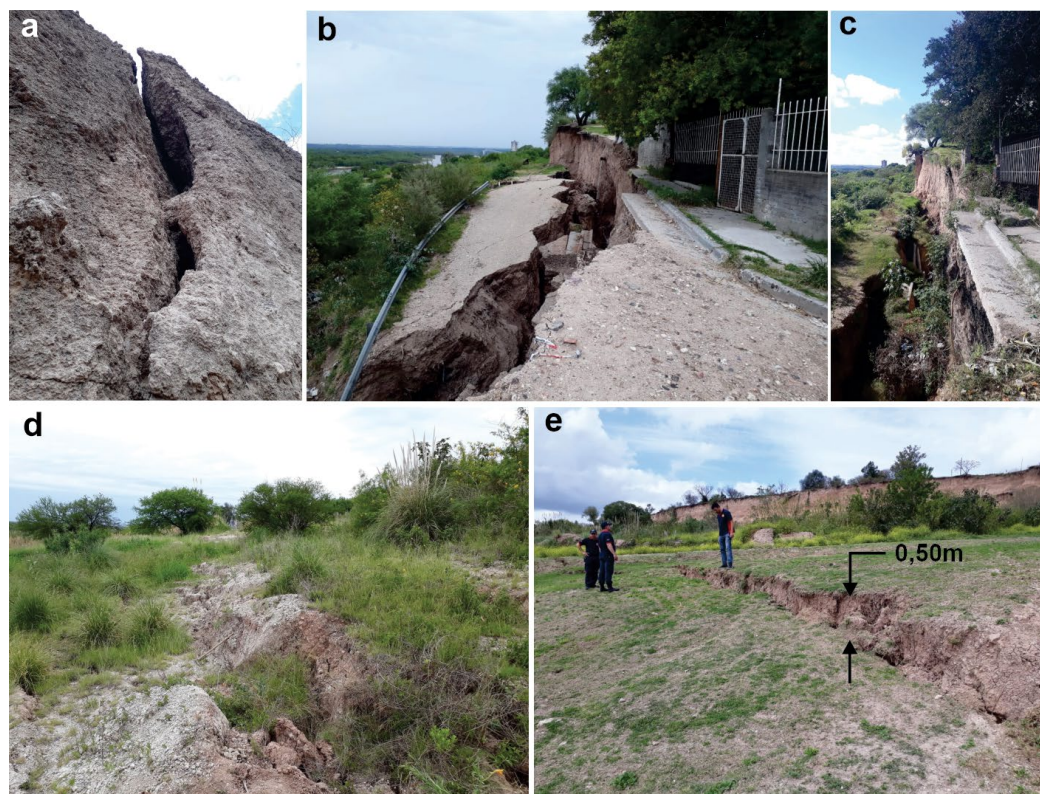


Figura 10. Bloques fracturados y desprendidos de la barranca alta del sector del Cristo Pescador: a) 26 de septiembre de 2018; b) 22 de octubre de 2018; c) 29 de abril de 2019; d) materiales producto de caídas mezclados, deformados y erosionados; e) fallas verticales normales en los materiales de mezcla que conforman las lomas de la planicie baja.

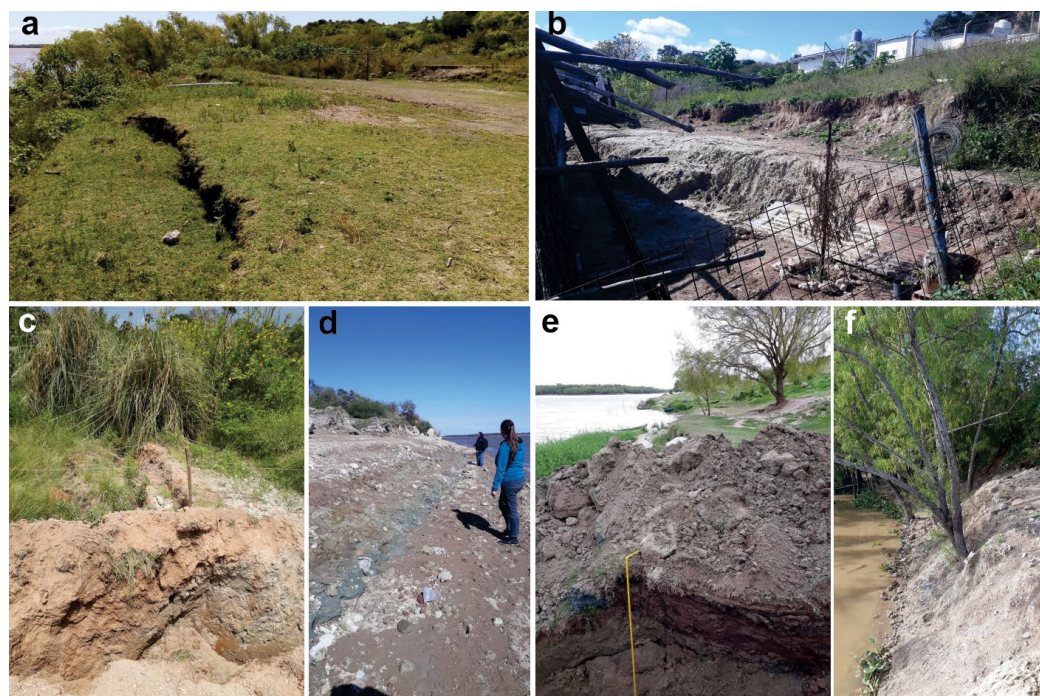


Figura 11. El mecanismo de deformación por estiramiento a partir del flujo del material arcilloso generó múltiples sistemas de fallas de distensión, en Pueblo Viejo (a y b), y en el Cristo Pescador (c). Se observan rechazos verticales y escarpas del orden de decenas de centímetros hasta 1m de altura. En la parte exterior de la planicie baja, el flujo de las arcillas en dirección al canal generó crestas de presión, en el Cristo Pescador (d y e) y en Pueblo Viejo (f). Obsérvese el afloramiento de arcillas en las crestas de presión (d).

Unidades geotécnicas

Las variaciones verticales de los parámetros geotécnicos medidos en el laboratorio y durante la perforación permitieron definir un conjunto de unidades geotécnicas (UG) desarrolladas a lo largo del tramo perforado. Estas unidades se caracterizan por presentar propiedades mecánicas (Anexo 2) que le confieren un comportamiento reológico particular antes

variaciones naturales del campo de esfuerzo o cambios en la resistencia del material, como ocurre en los materiales finos ante el aumento en el contenido de agua (HN).

Las perforaciones de la Sección 1, por encontrarse en la parte alta de la barranca, permitieron caracterizar geotécnicamente a la columna estratigráfica en su condición original. Las mismas penetraron más de 30 m de la Formación Paraná, de

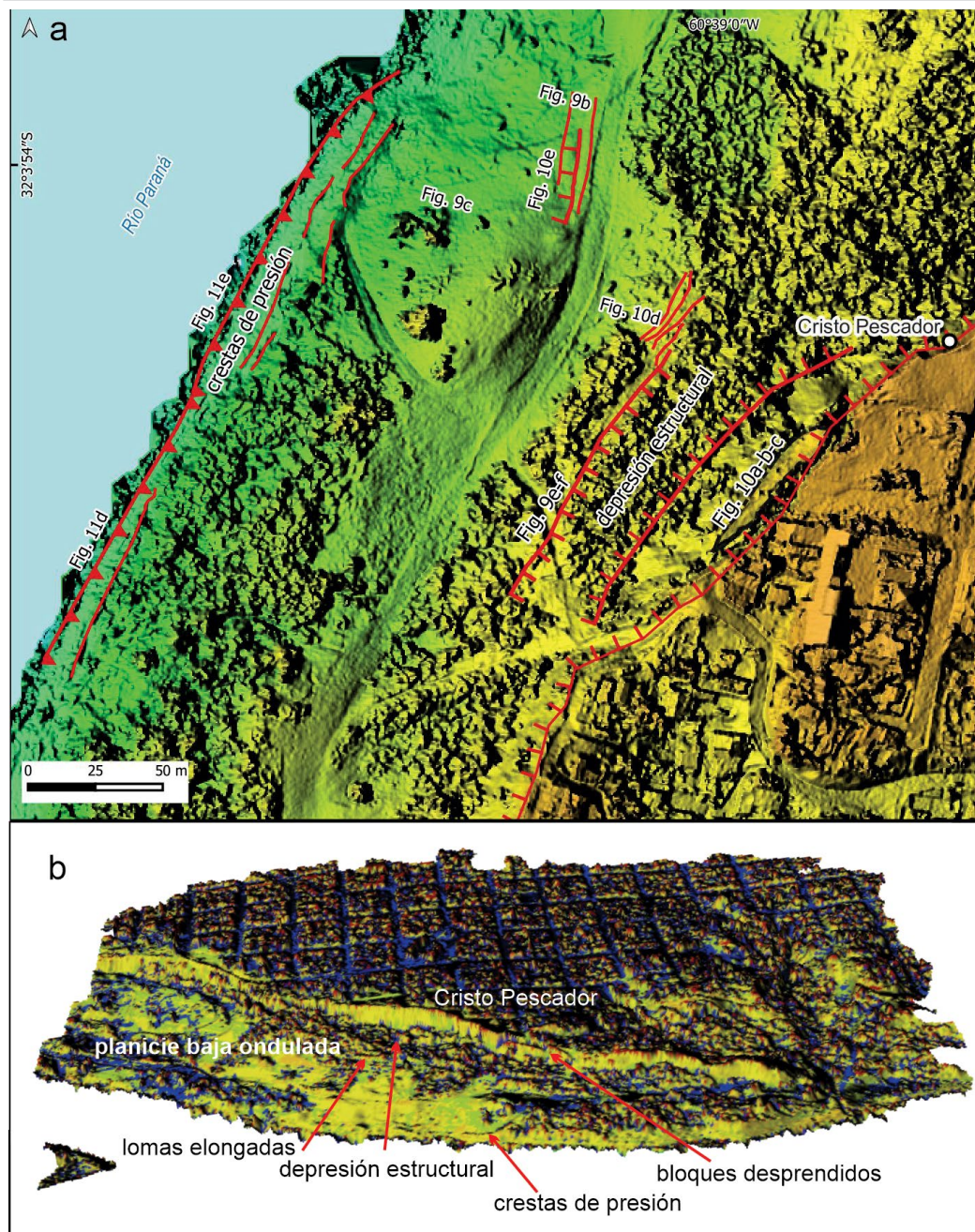


Figura 12. Geomorfología del sector de barrancas de la ciudad de Paraná: a) Estructuras de deformación en la planicie baja, debido al proceso de remoción en masa; b) En la imagen 3D obtenida de VANT (0.50 m) se identifica el bloque mayor desprendido en el evento de octubre de 2018, la fosa que se generó en la base adyacente a la barranca y la planicie baja de acumulación de bloques desprendidos y deslizados a lo largo de tiempo. Esta planicie corresponde a la faja de deformación de arcillas. Sobre la margen del río Paraná se desarrollan las estructuras de compresión (crestas de presión), generadas por el proceso de expansión lateral.

los cuales solo los primeros metros se encuentran aflorando en la base de la barranca. Suprayace mediante una discontinuidad estratigráfica el Grupo Punta Gorda, integrado por las formaciones Puerto General Alvear, La Juanita y Punta Gorda (Fig. 14). Mediante el análisis de los datos fue posible diferenciar cinco unidades geotécnicas en los pozos profundos, de las cuales tres pertenecen a la Formación Paraná (UG1, UG2 y UG3) y dos pertenecen al Grupo Punta Gorda (UG4 y UG5). Una sexta unidad geotécnica fue reconocida en la Sección 2 y corresponde al material incorporado en la parte baja por el retroceso de la barranca (UG6).

UG1: Unidad ubicada en la base de las perforaciones. Integrada por arena fina limosas de color castaño, con un

contenido de arena fina de >80% y finos de finos <20%. La plasticidad es media, con un IP promedio de 45.6%. Presenta alta resistencia a la penetración, mayor a 50 (SPT: 50/7 en el primer intento).

UG2: Unidad integrada por arcillas grasas verdes y verde oscuro. El espesor varía entre 12 y 15 m. Presenta una alta plasticidad, con un IP medio de 58% y valores máximos de 70%. La densidad húmeda y seca promedio son de 1.83 tn/m³ y 1.28 tn/m³ respectivamente, con valores mínimos que llegan a 1.75 tn/m³ en húmedo y 1.15 tn/m³ en seco. Esto le confiere una densidad menor que los sedimentos suprayacentes del orden de 14% en seco y 5% en húmedo. La resistencia a la penetración es medio a baja (<30). Análisis mineralógicos de



Figura 13. Desplazamientos de puntos de monitoreo en zona afectada por el proceso de remoción en masa. El campo de velocidades se expresa en cm/mes.

DRX en niveles aflorantes correlacionables con niveles atravesados en el pozo T2P3 sobre la costa testifican la preponderancia de arcillas esmécticas (Tineo com. pers).

UG3: Corresponde al tramo final de la Formación Paraná. Está integrada por limos compacto intercalados con niveles de arcillas. El color es verde y castaño verdoso. El espesor varía entre 10 y 18 m. La abundancia de limo en la fracción fina confiere a la unidad un comportamiento elástico. El IP promedio es de 22.7%. Presenta una resistencia a la penetración media a alta con mayoría de ensayos que superan los 50 golpes. Las densidades húmeda y seca promedio son de 1.93 tn/m³ y 1.47 tn/m³ respectivamente.

UG4: Está unidad geotécnica corresponde íntegramente a la Formación Puerto General Alvear. La unidad está integrada por un limo compacto cementado por carbonato de calcio, de color castaño claro. Intercalan arcillas de media plasticidad con bajo LL. Su espesor es de 5 a 6 m. El IP promedio es de 20%, con valores máximos en los niveles de arcilla de 26%. La resistencia a la penetración es media a alta. Presenta densidad húmeda y seca de 1.94 tn/m³ y 1.48 tn/m³, respectivamente.

UG5: Unidad integrada por las formaciones La Juanita, Punta Gorda y Tezanos Pintos cuando esta última unidad se encuentra desarrollada como en el caso del pozo T1P1.

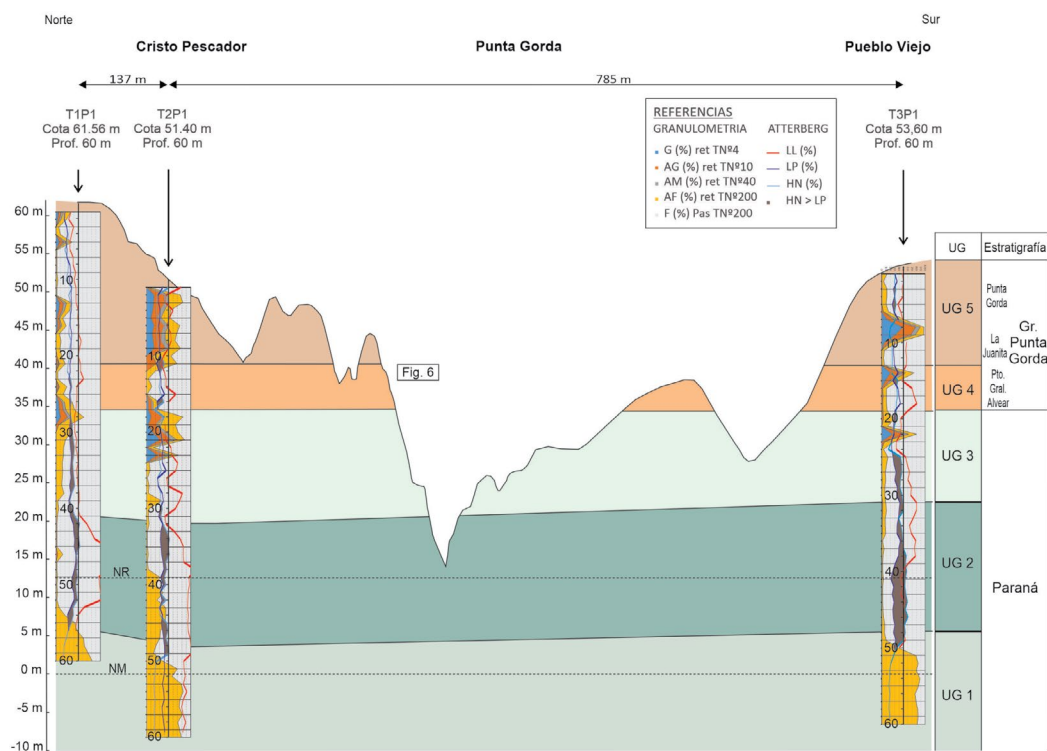


Figura 14. Sección 1. Corte geológico longitudinal sobre la barranca que muestra la correlación de las UGs. Nótese la continuidad de las unidades a lo largo del tramo analizado de la barranca entre la zona del Cristo Pescador y el barrio Pueblo Viejo.

La unidad está integrada por un limo castaño en parte arenoso. Intercalan arcillas de mediana plasticidad. El espesor atravesado varía entre 12 y 14 m. Presenta un IP promedio de 18,5% con valores máximos en los niveles de arcillas de 26%. Es una unidad con una alta resistencia a la penetración. Las densidades húmeda y seca son de 1.9 tn/m³ y 1.5 tn/m³, respectivamente.

UG6: Unidad identificada en la parte baja, formada por el material removilizado e incorporado por el retroceso de la barranca. En posiciones distales intercalan escamas de la UG2 con materiales limosos arenosos degradados de las otras unidades. Se trata de un depósito muy heterogéneo, integrado por bloques de diversos tamaños con una matriz de granulometrías fina y media; limo y arcilla de color castaño y verde, y arena fina de color castaño claro, formados por desintegración de los bloques deslizados. Presentan parámetros geotécnicos muy variados. La resistencia a la penetración es baja entre 7 y 15 golpes.

DISCUSIÓN

Mecanismo de Remoción en masa

Del análisis de los pozos geotécnicos surgen dos factores de carácter intrínseco que proporcionan a la gravedad desencadenar en el proceso de remoción en masa, Límite Plástico (LP) y densidad. La Humedad Natural (HN) es la variable

extrínseca que dispara el proceso una vez que dicho valor supera el umbral dado por el LP.

La arcilla verde de la unidad UG2 se caracteriza por presentar una alta plasticidad, con un IP entre 40-80%. La densidad relativamente baja le confiere flotabilidad (buoyancy), inferior a la que presentan los materiales de la secuencia estratigráfica suprayacente del orden de 15% en seco y de 9 a 4% en húmedo (Fig. 15). Estas dos propiedades del sedimento, sujetas a condiciones de HN extrema que excede el LP, confieren a las arcillas una muy alta movilidad, sobre todo cuando estas se encuentran muy próximas al talud de la barranca. La presencia en superficie de arcillas, que en posición original se encuentran a una profundidad de 40 m, es una evidencia de la alta movilidad. Las arcillas migran desde subsuelo a la superficie por descompresión y flotabilidad como consecuencia de la menor densidad que muestran con respecto a la columna sedimentaria suprayacente.

El movimiento de remoción en masa se dispara cuando la HN que contiene la unidad UG2 supera el LP (HN>LP). Dicha humedad en niveles sedimentarios con alto rango de plasticidad (IP=LP-LL>30%) propicia que el sedimento adquiera un comportamiento plástico. Se deforma y es expulsado como consecuencia de que la carga litostática supera la resistencia de la unidad (e.g., el sedimento húmedo se deforma o cambia de forma de manera irreversible cuando es sometido a esfuerzos diferenciales) (Fig. 15). La arcilla comienza lentamente a moverse y migrar hacia la planicie baja y el

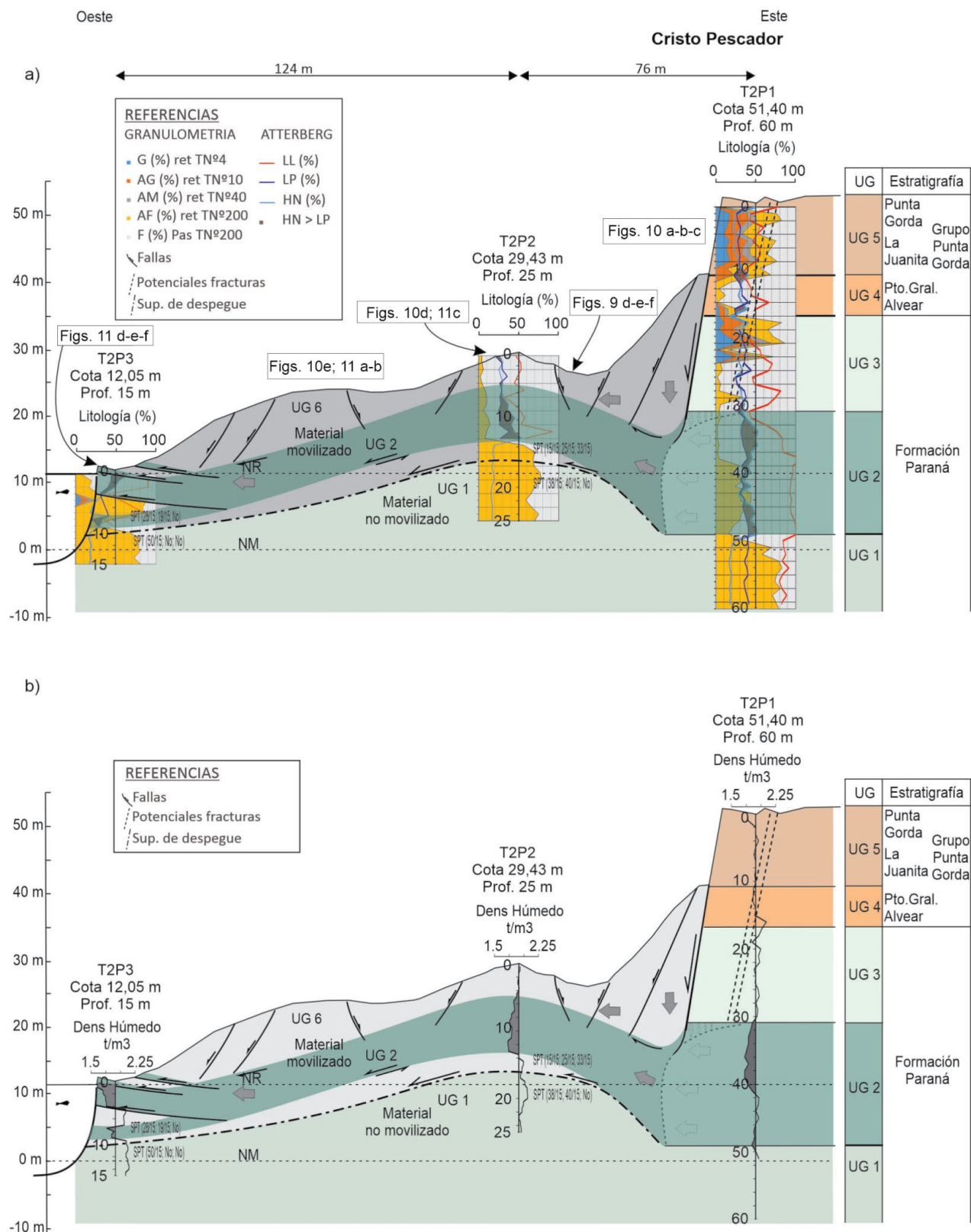


Figura 15. Sección 2. Corte geológico transversal a la barranca que grafica la correlación de las unidades geotécnicas entre el frente de la barranca y la zona baja: a) Correlación con datos sedimentológicos, índices de plasticidad (LP y LL) y humedad natural (HN). Nótese como la expulsión del material que conforma la unidad UG2 (flechas vacías) debilita el frente de la barranca y motoriza la deformación de la zona baja. La movilidad de la UG2 se dispara cuando la HN supera el LP; b) Correlación utilizando la densidad en húmeda. Nótese el contraste de densidad de la unidad UG2 con las unidades suprayacentes. La baja densidad de la unidad UG2 promueve la movilidad por fuerza de flotabilidad (buoyancy) generando presión y empuje en la zona baja (Holtz y Kovacs 1981).

sector externo, facilitada por flotabilidad y descompresión que produce la ausencia de una columna estratigráfica completa previamente erosionada y movilizada. La remoción de arcilla de la unidad UG2 desde su posición original hacia zonas de menor presión produce dos efectos combinados. Por un lado, genera desestabilización de la barranca por pérdida de masa, y por otro, produce presión sobre el propio UG2 de la zona baja deformada y movilizada previamente.

La pérdida de masa al pie de la barranca, por eyección desestabiliza gravitacionalmente la columna estratigráfica quitando sustento a los niveles elásticos suprayacentes (UG3, UG4 y UG5) cercanos al borde de la barranca. Esto produce formación de fracturas que se propagan hasta el techo de la barranca. Las fracturas se nuclean en zonas débiles localizadas en las UG4 y UG5 donde $HN > LP$ (Fig. 15). Por otro lado, la eyección de la arcilla actúa como un pistón sobre el material plástico de la zona baja previamente movilizado, produciendo la expansión y el transporte del material suprayacente incorporado por desmoronamiento y caída de bloque (UG6). Este último proceso genera al pie de la barranca un depósito heterogéneo, mal seleccionado, que aglutina grandes bloques en una matriz limo arcillosa.

La movilización de la unidad UG6 por expansión de la unidad UG2 removilizada, genera paulatinamente una fosa o depresión estructural elongada al pie de la barranca (Fig. 12). Esta situación precipita el anegamiento y la consecuente proliferación de una flora hidrófita manteniendo elevada la humedad en cercanía del talud. La expansión y desplazamiento

de la zona baja también está documentada por el desarrollo de fallas normales subparalelas y oblicuas a la barranca (Figs 10e y 11a). En la zona distal próxima al río, se produce el apilamiento de escamas del material deslizado donde intercalan niveles deformados de las unidades UG2 y UG6, en muchos caso indiferenciable e incluido como UG6. El apilamiento distal forma la cresta de presión paralelo al río (Figs. 11 d-f y 12). La zona de desacople entre los materiales movilizados y no movilizados se encuentra en el techo de la unidad UG1, muy próximo a la UG2 removilizada. Dicha superficie se manifiesta por el contraste de resistencia que presentan ambos materiales. La zona inmovilizada presenta alta resistencia, con un índice de penetración alto que supera los 45 o 50 golpes cada 15 o menos centímetros en el primer intento (45/15; 0/0; 0/0). La sección transversal (Fig. 15) muestra una superficie de desacople con geometría cóncava que se profundiza en los extremos, hacia al pie de la barranca y hacia la parte externa donde se forma la cresta de presión. Esta interpretación se verifica a partir del monitoreo de movimientos a partir de puntos de control (Fig. 13). En su conjunto, la velocidad de movimiento del proceso de remoción es lenta; del orden de centímetros mensuales. Por un lado, la fractura principal desarrollada sobre la barranca y que precipitó el desgajo del bloque se mantuvo una vez originada más de 30 días abierta sin manifestación visible de movimiento vertical. Iniciado el colapso del bloque, el mismo se deslizó con una tasa del orden de 30 a 20 cm diarios durante los primeros 15 días, desacelerándose paulatinamente en el transcurso de un mes

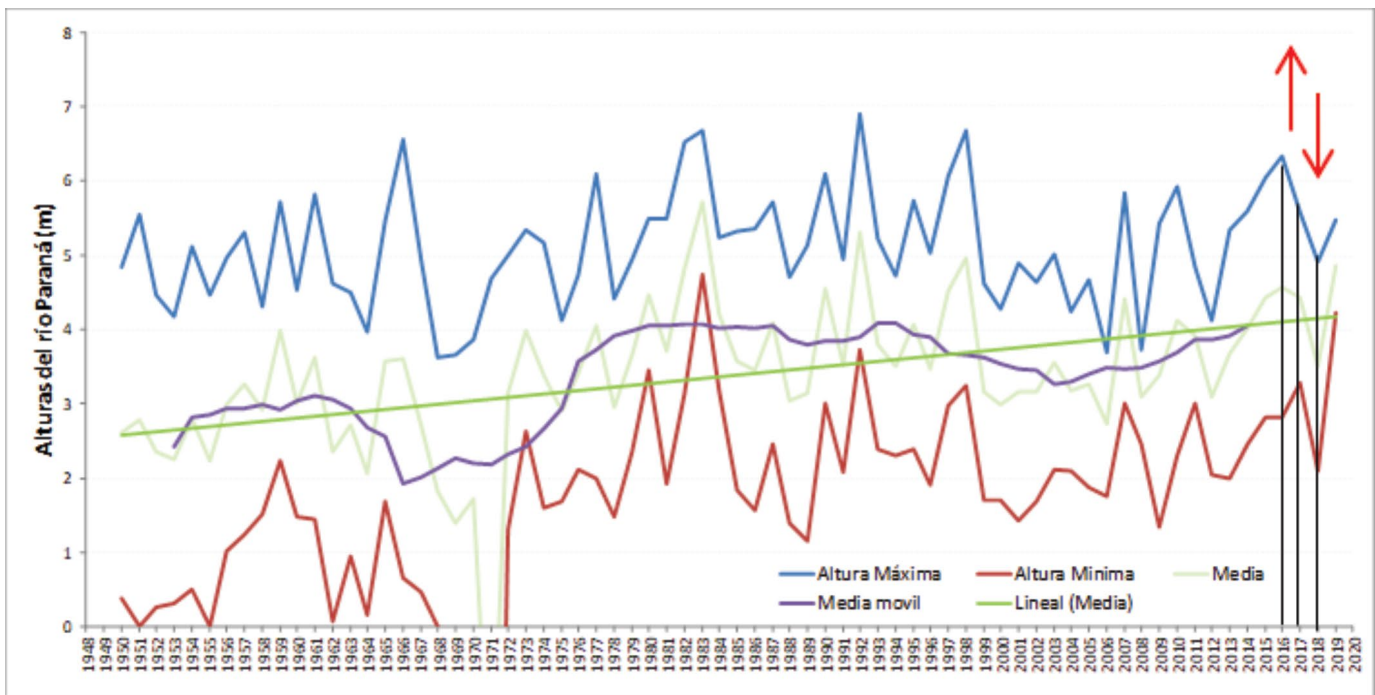


Figura 16. Variaciones históricas de las alturas del río Paraná en la estación hidrométrica de la Prefectura Naval de Diamante.

hasta hacerse casi imperceptible el movimiento. La zona baja por otro lado manifestó un movimiento más continuo previo y posterior al desarrollo de la fractura principal. Las mediciones de los puntos fijos realizados durante tres meses entre los 8 y 10 meses después del colapso manifestaron tasas de desplazamiento de hasta 6 a 15 cm/mes, con un movimiento en dirección noroeste (Fig. 13). La deformación parece haberse acelerado y migrado hacia el norte del área de los desprendimientos de bloques más importantes. Estas observaciones explicarían el hecho de que se produjeron nuevos desprendimientos en la primera semana de septiembre de 2019, en el barrio vecino, a 60 m de distancia del Cristo Pescador (Brunetto y Soffiantini 2019). Nuevas fracturas y deslizamientos de magnitudes importantes ocurrieron en marzo de 2022 en ese sector situado al Norte.

Secuencia temporal del proceso

La aparición temporal de las fracturas durante la gestación del movimiento junto con los rasgos geomorfológicos identificados en el campo y el análisis de los parámetros geotécnicos, posibilitan reconstruir una secuencia evolutiva del proceso de remoción en masa propuesto en la barranca de Diamante:

Estadio 0: Corresponde al momento previo al movimiento.

Estadio 1: Se produce la eyección de la arcilla de la UG2 por descompresión y flotabilidad y al pie de la barranca una vez que la $HN > LP$.

Estadio 2: El empuje y movilización de la arcilla de la unidad UG2 s en la zona baja se produce por continuidad litológica, condición que moviliza y desplaza del material suprayacente que constituye la unidad UG6. El movimiento expansivo genera un campo de esfuerzo superficial extensional con desarrollo de fracturas y fallas normales en la parte próxima y media. Distalmente el material removilizado se apila y forma la cresta de presión con el desarrollo de fallas inversas de bajo ángulo, buzantes hacia la barranca

Estadio 3: La eyección de la arcilla precipita la inestabilidad gravitacional en el borde de la barranca por pérdida de masa y deformación plástica de la unidad UG2.

Estadio 4: La pérdida de sustento fractura la columna suprayacente elástica y frágil. El esfuerzo se nuclea dentro de zonas inestables ubicadas en las unidades UG3, UG4 y UG5 donde los LP y LL presentan valores bajos, donde la HN supera fácilmente dichos límites ($HN > LL > LP$).

Estadio 5: Se produce la fractura de la barranca con propagación de la fractura hasta los niveles débiles de las UG3, UG4 y UG5. Posteriormente se produce el colapso de los bloques desgajados por caída.

Estadio 6: El material colapsado es incorporado y remo-

vilizado por la expansión de la unidad UG2 removilizada en la zona baja.

La descripción explica un proceso de remoción en masa complejo condicionado por la alta actividad de la arcilla de la UG2 que al eyectarse como consecuencia de saturaciones de agua que exceder el LP ($HN > LP$) desestabiliza y fractura la barranca, movilizándolo por efecto pistón y continuidad litológica la zona baja que sustenta el material previamente desprendido. De acuerdo a la clasificación de Lynn y Bobrowsky (2008) se trataría de proceso de remoción en masa combinado, con expansión (*spreads*) de la zona baja y desprendimientos (*Falls*) y/o volcamientos (*Topples*) en el frente de la barranca. El mecanismo propuesto se encuadra dentro del tipo de remoción en masa definido como Expansión Lateral (*Lateral Spread*). El arqueamiento del plano de desacople, ubica al proceso dentro de la variante de Expansión Lateral definida por Hutchinson como de "Arqueamiento o Combaamiento" (*Cambering*) (Cudden y Varnes 1996). De acuerdo a estos autores tal proceso se identifica en valles fluviales que inciden (cortan) una sucesión estratigráfica horizontal o sub-horizontal en la que intercala a nivel medio del río, un material plástico entre materiales más competentes, rígidos y elásticos (Cudden y Varner 1996). Situación similar se da en la estratigrafía de las barrancas de Diamante. Estos resultados e interpretaciones validan las observaciones y propuesta de Cravero et al. (2018) y Fauqué et al. (2022), sumando información que permite obtener un modelo más complejo. Estos avances amplían el enfoque de los modelos previos, sólo basados en desplazamientos gravitacionales de la columna superior sobre un nivel de despeque y una falla lítrica maestra (Díaz et al. 2005).

Evolución histórica e implicancias climáticas

Por su parte, el análisis histórico muestra una aceleración del retroceso de la línea de barrancas de la zona, durante la segunda mitad del siglo 20. Esto sugiere un aumento de las condiciones promedio de los parámetros hidrodinámicos de aguas subterráneas y una intensificación de los fenómenos extremos disparadores del proceso. Esta observación coincide con los análisis realizados sobre la evolución climática durante el Siglo 20 y primeras décadas del Siglo 21, en la cuenca media del Río de la Plata (Penalba y Robledo 2010, Doyle y Barros 2011, Cavalcanti et al. 2015, Lovino et al. 2022). Si bien los disparadores del episodio ocurrido desde octubre 2018, muy probablemente responden a la naturaleza episódica intrínseca del fenómeno, son resultado de una convergencia de controles. Considerando la dinámica de los deslizamientos interpretada, probablemente existe una influencia de los forzantes climáticos de gran escala. Durante

los meses previos al evento de deslizamientos de bloques principales, se registró un ciclo caracterizado por un evento El Niño muy intenso (septiembre de 2014 - mayo de 2016), seguido de eventos La Niña leves (julio-diciembre de 2016 y septiembre de 2017 - mayo de 2018) (NOAA 2022). Puede verificarse la influencia de estas teleconexiones ENSO en el registro hidrométrico del nivel de Río Paraná en la estación de Prefectura Naval de Diamante (Fig.16). Hubo un ascenso del nivel medio anual del río Paraná durante 2015-2016-2017 (4,43-4,57m) seguido de un descenso marcado durante 2018 (3,5 m). Y un marcado contraste de las máxi-

mas alturas entre 2016 y 2018 (6.33 m y 4.91 m respectivamente).

Dada la naturaleza del mecanismo de remoción en masa, con fuerte incidencia del fenómeno de saturación de arcillas en la base de las barrancas, y posterior pérdida de sustento que deriva en el flujo y expansión lateral, parece existir una relación con la oscilación de los caudales en el río Paraná. Considerando que no es un fenómeno gravitacional típico, este mecanismo podría ser fuertemente controlado por las oscilaciones en el nivel hidrométrico del río Paraná. La influencia de las oscilaciones hidrométricas en el proceso de saturación de arcillas basales, también fue observado por Cravero et al. (2018), analizando el registro de la estación de la ciudad de Corrientes. En este caso, además de la saturación directa, la influencia del control hidrogeológico sobre los niveles de arcillas tendría relación con los cambios en el nivel de base de la descarga del acuífero libre, a partir de las oscilaciones hidrométricas. El patrón observado en el período 2015-2018, mostrando un ciclo de ascenso y descenso de los niveles del río, podría vincularse con los ciclos de variabilidad climática interanual. El comportamiento extremo de los caudales de los principales ríos de la cuenca del Río de La Plata responde no sólo al efecto en las precipitaciones debido a la fase El Niño, sino también al aumento de la convergencia de humedad en la baja atmósfera desde el Océano Atlántico (Barros 2013, 2014). La tendencia de ascenso sostenido de las alturas medias del río Paraná, durante los últimos 70 años, también puede observarse en el puerto de Diamante (Fig. 16). El incremento de la velocidad media de retroceso del frente desde la década del 70 (Cuadro 1), puede vincularse con la intensificación de los controles hidroclimáticos registrada en las últimas décadas. A su vez, el crecimiento urbanístico de la ciudad de Diamante muy probablemente ejerce una influencia antrópica sobre los procesos observados (Cravero et al. 2018). Y ejerce una retroalimentación positiva sobre el aumento de su frecuencia, que se suma a las tendencias climáticas. Sin embargo, en el caso de Diamante, la influencia del evento ENSO (2016-2017) y posterior evento La Niña (2018) parecen tener una marcada relación con los factores detonantes. Evidencias del fenómeno de movilización y deformación de arcillas plásticas, también fueron observadas en zonas de la costa del río Paraná sin urbanización, próximas a la ciudad de Diamante (balneario de la Aldea Valle María, Fig. 17).

El estudio del fenómeno de remoción en masa ocurrido en la localidad de Diamante desde octubre de 2018, estimula pensar enfoques más amplios para evaluar el peligro y diseñar las estrategias de mitigación, en el ambiente de barrancas del río Paraná. Deberían ampliarse los habituales enfoques



Figura 17. Fracturas de distensión en arcillas y materiales de mezcla, en zonas de domos elongados paralelos al frente de barranca, en la planicie baja del balneario de la Aldea Valle María. El sitio de las observaciones se encuentra a 6,3 km al Norte, a lo largo de la costa de la zona afectada por los fenómenos estudiados en Diamante.

basados en el análisis de la recarga de los acuíferos que descargan directamente sobre el frente de barrancas. A las estrategias para disminuir caudales de circulación (de aportes naturales y antrópicos), deberían sumarse consideraciones sobre la influencia de los procesos que ocurren en la zona de descarga de aguas subterráneas y la relación con la hidrodinámica del río Paraná.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la zona costera de Diamante es un área activa con un frecuente movimiento de la zona baja hacia el río, desencadenante de la fracturación y desmoronamiento de la barranca mediante el colapso y desplome de grandes bloques.

Los datos aportados por las perforaciones geotécnicas testifican la presencia de un nivel de arcilla de 10 a 15 m de espesor dentro de la Formación Paraná con elevados índices de plasticidad y baja densidad con respecto a los niveles suprayacente que promueve la movilidad y expulsión del material cuando la humedad natural supera el umbral del LP. La expulsión de la arcilla de su posición original empuja la arcilla de la zona baja arrastrando los sedimentos previamente colapsados hacia el río. Por otro lado, la pérdida de arcilla de su posición quita sustento a la columna inmediatamente cercana a la barranca promoviendo la generación de fracturas paralelas al frente.

La nueva información junto a las evidencias geomorfológicas y estructurales fortalecen la idea de que el movimiento gravitacional de la zona costera se ajusta al proceso de remoción en masa del tipo expansión lateral. Dicho proceso se produce en taludes formados por materiales estratificados en posición horizontal en el que se intercala un material plástico entre dos paquetes de material rígido y frágil. La alta movilidad del material plástico motoriza la expansión lateral del terreno de la zona baja haciendo colapsar y retroceder el frente de la barranca. El monitoreo de los desplazamientos de los materiales de la zona afectada (Figura 13), indican claramente que la planicie baja tiene mayor movilidad, favoreciendo dicha interpretación.

El análisis histórico de la velocidad de retroceso del frente de barrancas y de las tendencias medias y oscilaciones interanuales de la altura del río Paraná, robustecen la idea de que existe un marcado control hidroclimático sobre los mecanismos detonantes de los procesos de remoción en masa en este ambiente.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Estabilización de Barrancas de las localidades de Diamante y Santa Elena, 2019, financiado por el Consejo Federal de Inversiones (CFI) en convenio con la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos. Agradecemos a la Dirección de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional por facilitar el material de DEM a partir de VANT (0,5 m). Agradecemos a la Mg.Sc. M. Cecilia Zalazar por la elaboración de productos finales de geomorfometría y cartografía. Agradecemos al Dr. David Tineo por la realización e interpretación de los análisis de DRX de roca total y de arcillas.

Material suplementario

Anexo 1: <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1656/1657>

Anexo 2: <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1656/1656>

REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. 2000. La Formación Paraná (Mioceno medio): estratigrafía, distribución regional y unidades equivalentes. En: Aceñolaza, F.G. y Herbst, R. (eds.), El Neógeno de Argentina. Serie Correlación Geológica, Instituto Lillo: 14: 9-28, San Miguel de Tucumán.
- Aceñolaza, F.G. 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. INSUGEO. Serie Correlación Geológica 22: 1-160. Tucumán.
- Ayala, I.A. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificación y terminología. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía 4: 7-25.
- Barros, V.R., Garavaglia, C.R. y Doyle, M.E. 2013. Twenty-first century projections of extreme precipitations in the Plata Basin. International Journal of River Basin Management 11: 373-387.
- Barros, V.R., Boninsegna, J.A., Camilloni, I.A., Chidiak, M., Magrín, G.O. y Rusticucci, M. 2015. Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 6: 151-169.
- Brunetto, E., Ferrero, B.S. y Noriega, J.I. 2015. Late Pleistocene lithostratigraphy and sequences in the southwestern Mesopotamia (Argentina): Evidences of the last interglacial stage. Journal of South American Earth Sciences 58: 111-128.
- Brunetto, E., Kröhling, D.M. y Francisconi, M.C. 2014. La geomorfología de una región representativa de Pampa Norte y sur de la Mesopotamia en el contexto de los procesos endógenos. Aportes para el mapeo de áreas de llanura. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas: S13-30, Córdoba.

- Brunetto, E., Sobrero, F.S. y Gimenez, M.E. 2019. Quaternary deformation and stress field in the Río de la Plata Craton (Southeastern South America). *Journal of South American Earth Sciences* 91: 332-351.
- Brunetto, E. y Soffiantini, J. 2018. Análisis expeditivo de deslizamientos gravitacionales en la barranca del Río Paraná en el Cristo Pescador (Diamante). Informe técnico CONICET (inédito), 11 p., Diamante.
- Brunetto, E. y Soffiantini, J. 2019. Informe de retroceso del frente de Barranca Calle Catamarca. Informe técnico CONICET (inédito), 1 p., Diamante.
- Candela, A.M., Noriega, J.I. y Reguero, M.A. 2007. The First Pliocene Mammals from the Northeast (Mesopotamia) of Argentina: Biostratigraphic and paleoenvironmental significance. *Journal of Vertebrate Paleontology* 27: 476-483.
- Cavalcanti, I.F.A., Carril, A.F., Penalba, O.C., Grimm, A.M., Menéndez, C.G., Sanchez, E., Cherchi, A., Sörensson, A., Robledo, F., Rivera, J., Pántano, V., Bettolli, L.M., Zaninelli, P., Zamboni, L., Tedeschi, R.G., Dominguez, M., Ruscica, R. y Flach, R. 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin - Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology* 523: 211-230.
- Cravero, R., Fauqué, L., Oliva, J. y Tejedó, A. 2018. Peligrosidad por remoción en masa barrancas de la ciudad de Diamante, Provincia de Entre Ríos, Argentina. *Informes de Peligrosidad Geológica SEGE-MAR* (inédito), 39 p., Buenos Aires.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. En: Turner A.K. y Schuster R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Research Council, Transportation and Research Board, 247: 36-75, Washington D.C.
- Díaz, E., Dalla Costa, O. y Sanguinetti, J. 2005. Relaciones entre niveles acuíferos y deslizamientos de barrancas en Entre Ríos. Soluciones mediante sistemas drenantes. 2° Congreso de Hidrogeología, Actas: 12., Río Cuarto.
- Doyle, M. E. y Barros, V.R. 2011. Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *International Journal of Climatology* 31: 2234-2248.
- Fauqué, L., Cravero, R. y Tejedó, A. 2022. Caracterización de los procesos de remoción en masa en las barrancas de la ciudad de Diamante, provincia de Entre Ríos. 21o Congreso Geológico Argentino. Acta: 717-718, Puerto Madryn.
- Fili, M.F., Dalla Costa, O.A., Díaz, E. y Giorgio, E. 2002. Estudios Hidrogeológicos para la estabilización de deslizamientos de barrancas en la ciudad de Diamante. Provincia de Entre Ríos. Argentina. 32o IAH & 11o ALSHUD Congress Groundwater and human Development, Mar del Plata.
- Highland, L.M. y Bobrowsky, P. 2008. *The Landslide Handbook. A Guide to Understanding Landslides*, 1325, 60 p., Virginia.
- Holtz, R.D. y Kovacs, W.D. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall Editor, 733 p., New Jersey.
- Instituto Geográfico Nacional 2021. Argenmap. <https://mapa.ign.gov.ar>
- Iriondo, M. 1998. Excursion Guide: Province of Entre Rios. *International Joint Field Meeting: Loess in Argentina: Temperate and Tropical*. IN-QUA-PASHCLIP-UNER-CECOAL (inédito) 3: 19 p., Paraná.
- Iriondo, M. H. y Kröhling, D. 2008. Cambios ambientales en la cuenca del Uruguay (desde el Presente hasta dos millones de años atrás). Universidad Nacional del Litoral, 358 p., Santa Fe.
- Jasiewicz, J. y Stepinski, T.F. 2013. Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology* 182: 147-156.
- Lovino, M.A., Müller, G.V., Pierrestegui, M.J., Espinosa, E. y Rodríguez, L. 2022. Extreme precipitation events in the Austral Chaco region of Argentina. *International Journal of Climatology* 1-22.
- Morbidoni, N.P., Larangeira, D. y Sanguinetti, J.A. 1984. Protección de barrancas en el área de emplazamiento de las torres de alta tensión, Paraje la Toma, Paraná. 8o Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Neuquén.
- Morbidoni, N.P., Simián, F., Sanguinetti, J.A. y Ceresole, R. 1982. Características geotécnicas y análisis de estabilidad de las barrancas en la Zona del Estribo (Cierre Chapetón - Proyecto Paraná Medio). 7o Congreso Argentino de Mecánica de Suelos y Fundaciones, Rosario.
- NOAA 2022. Cold & Warm Episodes by Season. <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>
- Penalba, O.C. y Robledo, F.A. 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change* 98: 531-550.
- Pérez, L. 2013. Nuevo aporte al conocimiento de la edad de la Formación Paraná, Mioceno de la provincia de Entre Ríos, Argentina. En: Brandoni D. y Noriega J.I. (eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 14: 7-12, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- Rivas Rocha, C.H. 1978. Reconocimiento de causas y efectos de los desmoronamientos de las barrancas del río Paraná entre Paraná y La Paz. Provincia de Entre Ríos. Consejo Federal de Inversiones (CFI), Informe de Comisión (inédito), 44 p., Paraná.
- Sanguinetti, J. 1995. Anteproyecto de Estabilización de Barrancas de la Ciudad de Diamante. SUPCE Entre Ríos, informe técnico (inédito), 2 tomos, Diamante.
- Soffiantini, J. 2018. Informe sobre el estado de avance de deslizamiento de tierra en la zona del Cristo Pescador. Informe técnico CONICET (inédito), 4 p., Diamante.