



Identificación y caracterización geológica y geotécnica de procesos gravitacionales activos en las barrancas del río Paraná en Villa Hernandarias, Entre Ríos

Alejandro E. CELLI¹ y Pablo R. ROSA VILARDO¹

¹Cátedra de Geología Aplicada, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional

Email: acelli@frba.utn.edu.ar

Editor: Diego A. Kietzmann

Recibido: 28 de enero de 2023

Aceptado: 5 de junio de 2023

RESUMEN

Los procesos de remoción en masa suelen ser asociados a regiones montañosas, alejadas en nuestro país de los grandes centros urbanos. Sin embargo, existen vastos ejemplos de laderas inestables vinculadas a valles fluviales maduros (SINAGIR 2018, Cravero et al. 2018, Celli y Rosa Vilardo 2021, Celli et al. 2021, SEGEMAR, 2023). Las barrancas del Paraná, emplazadas en una de las zonas más húmedas y productivas de la Argentina, son escenario de una notable variedad de procesos activos, que afectan a diversas localidades litorales. Sobre la margen entrerriana, en el entorno de Villa Hernandarias, aflora una secuencia sedimentaria, hidroestratigráficamente conocida como Sección Epiparaniana, que es objeto de análisis en este trabajo, desde una óptica geotécnica. En esta barranca pueden reconocerse diversos mecanismos de deslizamientos y flujos, que configuran una serie de movimientos complejos, íntimamente relacionados con las características mecánicas e hidráulicas de las distintas unidades aflorantes, a partir de las cuales son definidas en este trabajo cuatro unidades geotécnicas. Se exponen a su vez los principales factores que condicionan la estabilidad de las barrancas, a la vez que se detallan los procesos activos reconocidos en el sector estudiado, incluyendo el posible desarrollo de un ambiente kárstico leve en la región.

Palabras clave: Movimientos en masa – Valles fluviales maduros – Karst – Geomorfología – Geología urbana

ABSTRACT

Identification and geological and geotechnical characterization of active gravitational processes on Paraná River slopes in Villa Hernandarias, Entre Ríos.

Landslides are usually associated with mountainous regions, far in our country from large urban centers. However, there are vast examples of unstable hillsides linked to mature river valleys. (SINAGIR 2018, Cravero et al. 2018, Celli y Rosa Vilardo 2021, Celli et al. 2021, SEGEMAR, 2023). Paraná slopes, located in one of the most humid and productive areas of Argentina, are the scene of remarkable variety of active processes affecting different coastal populations. In the area of Villa Hernandarias, on the Entre Ríos margin, a sedimentary sequence, hydrostratigraphically known as Epiparaniana Section, emerges, being the object of analysis in this work, from a geotechnical perspective. In this slope, different landslide and flow mechanisms can be recognized, generating a series of complex movements, closely related to the mechanical and hydraulic characteristics of the different outcropping units, from which four geotechnical units are defined in this work. Additionally, the main factors that determine slope stability are presented, while the active processes recognized in the studied sector are detailed, including the possible development of a mild karst environment in the region.

Palabras clave: Landslides – Mature river valleys – Karst – Geomorphology – Urban geology

INTRODUCCIÓN

La creciente expansión demográfica global obliga cada vez más a ocupar sitios relegados por la complejidad de su terreno, lo que repercute en un incremento de las consecuencias asociadas a la ocurrencia de distintos tipos de procesos naturales o cuasi naturales, en el sentido de Jones (1993).

En la Argentina, las inundaciones y sequías constituyen los procesos que mayor afectación generan, tanto sobre las poblaciones ribereñas, como sobre la producción agrícola – ganadera. Esta situación ha dejado históricamente relegado el interés sobre los procesos de remoción en masa, que afectan una vasta extensión de nuestro territorio. Asociados a variaciones más o menos abruptas del relieve, se los puede encontrar con frecuencia en regiones montañosas escasamente pobladas. Sin embargo, también se presentan en ambientes llanos o mesetiformes, donde los cursos fluviales maduros (Davis 1899) alcanzan a labrar terrazas o barrancas (Celli 2015, Cravero et al. 2018, García Aráoz y Celli 2021, Celli 2022, Pereyra et al. 2023).

El río Paraná, el de mayor caudal de la Argentina, discurre a través de la región más poblada y productiva del país, labrando barrancas en materiales cuaternarios, con amplio desarrollo en las provincias de Corrientes y Entre Ríos.

Estos resaltos topográficos favorecen la generación de movimientos en masa de una magnitud relativamente baja a media. Sin embargo, la cantidad de elementos en riesgo presentes y su grado de exposición, derivan en un elevado riesgo para las poblaciones y actividades asentadas en este ambiente (Rosa Vilardo 2021, Celli y Rosa Vilardo 2021).

En los últimos años, la bajante histórica del río Paraná ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con un mayor conocimiento geológico, geomorfológico y geotécnico sobre la zona más productiva y densamente poblada del país (Celli et al. 2021).

Específicamente en el área bajo estudio, a unos 100 km al noroeste de la ciudad de Paraná (Fig. 1), se produjo en el año 2003 un deslizamiento en la zona sur de la localidad de Villa Hernandarias, afectando a una serie de edificaciones emplazadas sobre el coronamiento de las barrancas del río Paraná. Este evento motivó la ejecución de una importante obra de estabilización, cuya primera etapa fue llevada a cabo entre los años 2005 y 2010, abarcando la zona centro y sur de la localidad, entre las calles Nogoyá y Perón. La segunda etapa, que abarcaría el sector norte, no ha sido ejecutada hasta el momento (HYTSA 2019).

La obra construida se compone principalmente de una estructura de contención emplazada en el sector superior de la

barranca, entre cotas 55 y 45 m aproximadamente, conformada por dos muros anclados de hormigón armado. Los anclajes tienen una profundidad de 6 a 9 m. En el coronamiento de cada muro se construyó una losa de hormigón armado, soportada por pilotines de hormigón de 0.2 m de diámetro. Sobre la base de cada muro, se ejecutaron drenes horizontales de 12 a 17 m (Fig. 2). Por debajo de la obra de sostenimiento, se reperfiló la barranca hasta cota 38 m, donde se ejecutó una tercera línea de drenes, de 18 m de longitud, que descargan hacia una cuneta colectora, que abarca la mayor parte de la obra. Un sistema de conductos y cámaras de carga conducen el agua hacia un dissipador de energía, para luego descargar en el río Paraná (HYTSA 2019).

El proyecto contempló la ejecución de 14 freatímetros, cuyos niveles fueron registrados entre 2011 y 2016. La mayoría de ellos se encuentran hoy obstruidos, razón por la cual han dejado de medirse los niveles freáticos.

OBJETIVOS

El presente trabajo parte de la premisa de que cualquier intervención ingenieril sobre el terreno debe necesariamente contar con un conocimiento de las características y procesos que llevaron a la situación actual, y que podrían evolucionar en un futuro. No es posible elaborar una solución, sin antes comprender el problema.

Bajo este axioma, no siempre incorporado en los cronogramas y presupuestos, se intenta alcanzar un primer estado de situación de las características geológicas y geotécnicas que controlan los procesos gravitacionales reconocidos durante un relevamiento expeditivo efectuado en la localidad de Villa Hernandarias.

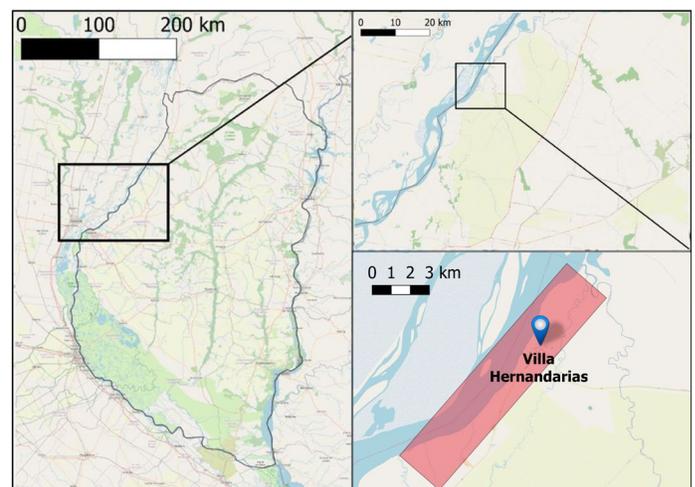


Figura 1. Ubicación del área de estudios, en la localidad de Villa Hernandarias y zonas aledañas, provincia de Entre Ríos.



Figura 2. Obra de estabilización de la barranca, en la zona de la calle Nogoyá.

Las observaciones aquí vertidas pueden ser tomadas como punto de partida para el análisis de los procesos actuantes en otros sectores de las barrancas del Paraná.

Se intenta a su vez contribuir en la concientización sobre la importancia que tienen, en términos de riesgo, los procesos gravitacionales de baja magnitud, en zonas con una importante exposición de personas.

Se aspira a que el presente trabajo se constituya en una herramienta más en la elaboración de políticas de ordenamiento territorial, planes de acción durante emergencias, sistemas de monitoreo y/o el diseño de obras de sostenimiento, que contribuyan al incremento de la seguridad de las poblaciones, sus bienes y actividades, y el ambiente.

METODOLOGÍA

La primera etapa del trabajo se inició con un análisis de los antecedentes disponibles en la región, tanto geológicos, como geomorfológicos, geotécnicos, hidrogeológicos e ingenieriles. A ello se sumó una síntesis de las principales características geográficas de la región (Rosa Vilardo 2021). Posteriormente, se analizaron las imágenes satelitales provenientes del Google Earth ProTM y modelos digitales de elevación obtenidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN 2019).

Entre los días 20 y 23 de junio de 2019, se llevó a cabo un relevamiento de campo en la zona de estudio. Durante esos cuatro días, se efectuó un reconocimiento geológico y geomorfológico de las barrancas del río Paraná en el área de Villa Hernandarias, extendiéndose tanto hacia el norte, hasta la localidad de Piedras Blancas, como hacia el sur, adentrándose en el área netamente rural, totalizando unos 10 km de laderas.

A lo largo del relevamiento, se describieron las características litológicas y geotécnicas de los materiales que componen las barrancas, definiendo una serie de unidades geotécnicas, en función de su comportamiento mecánico e hidráulico. Por su parte, se identificaron una serie de procesos activos asociados a las distintas unidades geotécnicas definidas.

Adicionalmente, a partir de la entrevista a personal del municipio y el diálogo con vecinos, se obtuvo información sobre las características de los eventos históricos y del diseño de las obras de sostenimiento ejecutadas y propuestas.

A partir de este reconocimiento, se lograron identificar los mecanismos intrínsecos y extrínsecos que controlan cada uno de los procesos gravitacionales descriptos.

Finalmente, se presenta una nueva zonificación geotécnica de las barrancas del río Paraná, válida para aquellos sectores con características geológicas similares a las presentes en la localidad de Villa Hernandarias.

CONSTITUCIÓN GEOLÓGICA DE LAS BARRANCAS DE VILLA HERNANDARIAS

La zona bajo estudio pertenece a lo que regionalmente se conoce como provincia geológica Mesopotamia, que forma parte de la Cuenca de Paraná, ampliamente expuesta en Brasil, Paraguay y Uruguay.

Durante el Mioceno tuvo lugar una importante transgresión marina, facilitada por la deformación por carga de flexión, generada debido al acortamiento orogénico de los Andes (Ramos 1999), dando origen a los depósitos de la Formación Paraná, que constituyen la base de las barrancas del río homónimo, no aflorante en la zona de interés.

La regresión marina dio lugar al desarrollo de una amplia sucesión de origen fluvial (Aceñolaza 2007). En el Plio-Pleistoceno, un importante abanico aluvial depositó las arenas fluviales de la Formación Ituzaingó, que progradan de noreste a sudoeste, a partir de Misiones. Durante el Pleistoceno, un clima más árido favoreció la depositación de las tobas calcáreas y calizas de la Formación General Alvear, y posteriormente las arcillas y limos lacustres y palustres de la Formación Hernandarias. Finalmente, durante el Holoceno, se depositaron los loess de la Formación Tezanos Pinto (Bertolini et al. 2008).

En la actualidad, la región es tectónicamente estable, por lo que la actividad sísmica es muy reducida, perteneciendo a la Zona 0 del INPRES (1996b), habiéndose registrado intensidades sísmicas máximas de IV en la escala de Mercalli Modificada (INPRES 1996a).

Durante el relevamiento efectuado en junio de 2019 en la localidad entrerriana de Villa Hernandarias, los autores han

Cuadro 1: Cuadro estratigráfico de la zona de estudio. Se indican los principales procesos geomorfológicos activos reconocidos durante el relevamiento, y se proponen cuatro nuevas Unidades Geotécnicas (I a IV).

EDAD	UNIDAD GEOLÓGICA	SUBUNIDAD GEOLÓGICA	LITOLOGÍA	ESPESOR APROX. [m]	UNIDAD GEOTÉCNICA PROPUESTA	PRINCIPALES PROCESOS ACTIVOS RECONOCIDOS	CORRELACIONES GEOLÓGICAS	CORRELACIONES GEOTÉCNICAS	CORRELACIONES HIDROGEOLÓGICAS
Pleistoceno	Formación Tezanos Pinto		Limos arcillosos loésicos castaño amarillentos	5		Carcavamiento / Deslizamientos rotacionales / Colapso / Disolución / Tubificación / Flujos de tierra	Fm. Punta Gorda	Unidad Geotécnica 1 (Franco et al. 2002)	Unidad Hidrogeológica F (Fili 2001)
		Superior	Arcillas limosas castañas con yeso diseminado y pequeñas concreciones carbonáticas	5 a 10	Unidad Geotécnica I				
		Media	Yeso masivo y en rosetas	1.0 a 1.5	Unidad Geotécnica II	Reptaje / Flujos de tierra / Deslizamientos rotacionales / Carcavamiento / Disolución	Grupo Pampa (Pampeano) Grupo Punta Gorda	Unidad Geotécnica 2 (Franco et al. 2002) Fm. Geotécnica C (AYEE 1976)	Acuitardo Hermandarias (Santi et al. 2013) Unidad Hidrogeológica E (Fili 2001)
Pleistoceno inferior- superior	Formación General Alvear	Inferior	Arcillas blancas grisáceas con concreciones carbonáticas	10 a 15					
		Superior	Tobas calcáreas, calizas y limos calcáreos	1 a 2	Unidad Geotécnica III	Caída de rocas / Vuelco	Fm. Yapoi Fm. Villa Urquiza	Unidad Geotécnica 3 (Franco et al. 2002)	
		Superior	Areniscas ocreas con cemento carbonático y estalactitas y tabiques calcáreos	2	Unidad Geotécnica IV	Erosión fluvial	Fm. Puelches Fm. Salto Chico	Fm. Geotécnica B' (AYEE 1976)	Acuífero Ituzaingó (Santi et al. 2013)
Mioceno superior	Formación Paraná	Superior	Arenas y areniscas ocreas muy friables	15 a 20	No reconocida	Expansión lateral / Deslizamientos rotacionales (en la localidad de Diamante)	Fm. Entre Ríos Fm. Pueblo Brugo	Unidad Geotécnica 4 (Franco et al. 2002) Fm. Geotécnica B (AYEE 1976)	Acuífero Paraná (Santi et al. 2013)
		Media	Arcillas arenosas calcáreas y conglomerados fosilíferos	5 a 15					
		Inferior	Arcillas verdes con yeso y fósiles	15 a 25					

reconocido una serie de unidades aflorantes en las barrancas del río Paraná, en consonancia con el perfil relevado por Díaz et al (2005) en la localidad de Santa Elena, que pueden apreciarse en la figura 3, y cuyas principales características y correlaciones se resumen en el cuadro 1. A continuación, se describe cada una de estas unidades, de base a techo, destacando en todos los casos una disposición subhorizontal.

Formación Paraná (Mioceno superior): Definida formalmente por Bravard (1858), se trata de depósitos marinos, que se encuentran en todas las cuencas sedimentarias del este y noreste argentino. En la provincia de Entre Ríos, algunos autores consideran los sedimentos del mar mioceno como una única unidad (Iriando 1973, Aceñolaza 1976); mientras que otros los dividen en Formación Paraná sensu stricto al miembro inferior de arcillas verdes, y Formación Entre Ríos a las arenas calcáreas fosilíferas que las sobreponen (Russo et al. 1979). A esta última unidad, Gentili y Rimoldi (1979) la denominan Formación Pueblo Brugo. Por su parte, los geólogos de AyEE (1976), sobre la base de información de perforaciones, consideraron a la Formación Paraná integrada por tres miembros: Un miembro basal de arcillas verdes con macro y microfósiles, poco potente, pero de extensión regional, que sobreyace a arcillas pardas con yeso continental. Un miembro intermedio, constituido predominantemente por arenas grises, finas y medianas, con intercalaciones lenticulares de arcilla verde, algo arenosa, con microfósiles. Y finalmente, un miembro cuspidal integrado por arcillas arenosas calcáreas y bancos conglomerádicos fosilíferos.

Durante el relevamiento de campo, se constató que esta formación no aflora en ningún sector de la barranca; sin embargo se la menciona, dada su importancia regional. Según datos de AyEE (1976), se emplazaría a cotas inferiores, por debajo del nivel del río Paraná.

Según Filí (2001), desde la localidad de Paraná hacia el Norte, el miembro superior no se encuentra presente, debido a que ha sido erosionado por el gran sistema fluvial que originó a la Formación Ituzaingó.

Este autor le asigna al miembro intermedio espesores del orden de 33 a 66 m, incluyéndolo junto con la suprayacente Formación Ituzaingó, en lo que denomina Unidad Hidrogeológica D. Por su parte, le confiere al miembro basal un espesor de entre 15 y 25 m, y lo integra, junto a las formaciones infra-yacentes, a la Unidad Hidrogeológica C.

Santi et al. (2013), por su parte, le confieren a la totalidad de la Formación Paraná la designación de Acuífero Paraná.

En función de su comportamiento mecánico e hidráulico, Franco et al. (2002) agrupan en la Unidad Geotécnica 4 a los miembros superior e intermedio, mientras que al miembro inferior lo incluyen en la Unidad Geotécnica 5. Por su parte,



Figura 3. Perfil geológico de la barranca ubicada al sur de las obras de contención, unos 200 m al sur de la calle Nogoyá.

AyEE (1976) agrupa a los primeros en la Formación Geotécnica B, y al último en la Formación Geotécnica A.

Cravero et al. (2018) interpretan un proceso de expansión lateral con base en esta formación, aflorante en la localidad de Diamante. Las observaciones efectuadas por Celli et al. (2021) apuntan en el mismo sentido.

Formación Ituzaingó (Plioceno inferior – Pleistoceno superior): Esta unidad de origen fluvial, ha sido definida formalmente por De Alba (1953), y es equivalente a la Formación Puelches, descrita en el subsuelo de Chaco, Santa Fe y Buenos Aires, y a la Formación Salto Chico, referida hacia el este de Entre Ríos. Su edad ha sido objeto de controversias (Herbst 2000), asignándose aquí un rango amplio que abarca las distintas evidencias.

Está constituida predominantemente por areniscas poco consolidadas, finas a medias, de color ocre (Iriando y Rodríguez 1973). AyEE (1976) le asigna espesores en la zona de las barrancas de entre 15 y 20 m.

En la zona de estudio se reconocieron afloramientos de esta formación en el tercio inferior de las barrancas, continuando su expresión por debajo del río Paraná (Fig. 4). Dentro de la porción aflorante, se identificaron dos sectores bien diferenciados. La zona inferior corresponde a areniscas muy friables, de color ocre, (Fig. 5); mientras que hacia el techo de la unidad, se identificaron tabiques de material carbonático y estalactitas, procedentes de la disolución de la suprayacente Formación General Alvear, que rellenan fisuras dentro de las areniscas y penetran en su estratificación entrecruzada, que



Figura 4. Vista general de las areniscas de la Formación Ituzaingó. Puede observarse un miembro superior, con estratificación entrecruzada cementada por material calcáreo resistente a la erosión. El miembro inferior, conformado por areniscas poco consolidadas, sin cemento carbonático, presenta una marcada erosión, provocada por el agua que escurre superficialmente por la barranca.



Figura 5. Areniscas color ocre, muy friables, pertenecientes al miembro inferior de la Formación Ituzaingó. Puede apreciarse cómo se desgranar al rasparlas con el martillo.

en algunos sectores es bien marcada (figura 6). Esta subunidad presenta espesores del orden de los 2 metros.

En función de sus características hidroestratigráficas constituye, junto al miembro superior de la Formación Paraná, la Unidad Hidrogeológica D de Filí (2001). Posteriormente, Santi et al. (2013) definen el Acuífero Ituzaingó en coincidencia con la formación homónima.

A partir de su comportamiento mecánico e hidráulico, AyEE (1976) define esta unidad como Formación Geotécnica B'.



Figura 6. Areniscas cementadas con tabiques de carbonato de calcio, pertenecientes al miembro superior de la Formación Ituzaingó, de mayor resistencia a la erosión que el sector inmediatamente inferior. El cemento proviene de la lixiviación de la suprayacente Formación General Alvear.

Formación General Alvear (Pleistoceno): Fue reconocida por Aceñolaza y Sayago (1980) a lo largo de las barrancas del río Paraná, desde La Paz hasta Diamante, con un espesor que no sobrepasa los 5 m. Estos autores correlacionan esta unidad con la Formación Yapoí, describiéndola como una toba calcárea de textura masiva y aspecto loésico, de color pardo anaranjado a pardo amarillento, con un contenido de carbonatos que aumenta hacia la base, llegando a constituir una tosca blanquecina. Posteriormente, Iriondo (1980) le asigna la denominación de Formación Alvear, a la cual más adelante se le antepondría el término "General", con relación a la localidad tipo entrerriana, a fin de diferenciarse del término acuñado por Caminos (1979) para las metamorfitas fueguinas (Aceñolaza 2007). Por su parte, Bertolini et al. (2008), la correlacionan con la Formación Villa Urquiza. Según Filí (2001), en el área de estudio se encuentra con regularidad entre cotas 35 y 40 m. Tujchneider (2001), incluye a esta unidad como la base del Grupo Pampa, denominación formal de los Sedimentos Pampeanos en la provincia de Santa Fe, en coincidencia con lo que Iriondo (1980) denomina en la provincia de Entre Ríos como Grupo Punta Gorda.

Durante el relevamiento de campo pudo reconocerse un banco de material calcáreo de 1 a 2 metros de espesor, de mayor resistencia a la erosión que el resto de las unidades presentes en las barrancas (Fig. 7). Se observaron a su vez evidencias de disolución de estas calizas, que han precipitado en las discontinuidades de la unidad inferior, hasta profundidades del orden de los 2 m (Figs. 4, 6 y 8). Franco et al. (2002) definen a esta formación, sobre la base de su comportamiento mecánico e hidráulico, como "Unidad Geotécnica 3". Filí (2001) define la Unidad Hidrogeológica E, abarcando



Figura 7. Detalle de las calizas de la Formación General Alvear, de elevada resistencia y baja erodabilidad.

tanto esta formación, como la suprayacente.

Formación Hernandarias (Pleistoceno): Fue definida formalmente por Reig (1957). Iriondo (1980) y Vitulich (1982), describen esta unidad como constituida fundamentalmente por arcillas montmorilloníticas de comportamiento expansivo, de origen lacustre y palustre, que afloran en gran parte de la provincia, cubriendo en discordancia a formaciones de diversa edad. El perfil típico está compuesto por un sector basal de arcillas grises, algo arenosas, con concreciones calcáreas. Una parte intermedia de arcillas castañas con abundante yeso, que llega a constituir yacimientos explotables. Finalmente, en los 5 a 10 m superiores, la secuencia es más limoarcillosa, el carbonato de calcio forma rodaditos, concreciones y agregados pulvulentos manchados por óxido de manganeso. Algunos autores correlacionan esta unidad, en conjunto con la subyacente, con el Grupo Punta Gorda (Iriondo 1980), o con el Grupo Pampa (Tujchneider 2001).

Durante el relevamiento, se identificó la presencia de esta formación a lo largo de todo el ámbito de la región, coronando las barrancas del río Paraná (Fig. 3). A partir de las observaciones efectuadas, se logró diferenciar el nivel basal arcilloso, de color blanco grisáceo, con presencia de concreciones carbonáticas, emplazado sobre los carbonatos de la Formación General Alvear, con un espesor de unos 10 a 15 metros (Fig. 9). Por encima de este, se emplaza un nivel intermedio, un poco más plástico, de color rojizo, con presencia de yeso diseminado, de un espesor equivalente al anterior. Sobre esta subunidad, se dispone en forma discontinua un banco de yeso masivo o en rosetas, de espesor métrico, que en algunos sectores se encuentra muy cercano al coronamiento de la barranca, y en otros a profundidades de hasta 10 m. Por encima de este banco, se emplaza un nivel superior arcillolimoso, de color castaño, con pequeñas concreciones carbonáticas y yeso diseminado, cuyo espesor varía en función de la disposición topográfica, alcanzando los 10 m (Fig. 10).

Sobre la base de sus características geotécnicas, AyEE



Figura 8. Disposición de banco de calizas de la Formación General Alvear, sobre areniscas de la Formación Ituzalngó, cementadas en su parte superior por material calcáreo proveniente de la disolución parcial de las calizas.



Figura 9. Sector inferior de la Formación Hernandarias, compuesto por arcillas blancas grisáceas, con presencia de concreciones carbonáticas.

(1976), define a la Formación Hernandarias como "Formación Geotécnica C"; mientras que Franco et al. (2002) la definen, para la zona de Diamante, como "Unidad Geotécnica 2". Hidroestratigráficamente, las formaciones General Alvear y

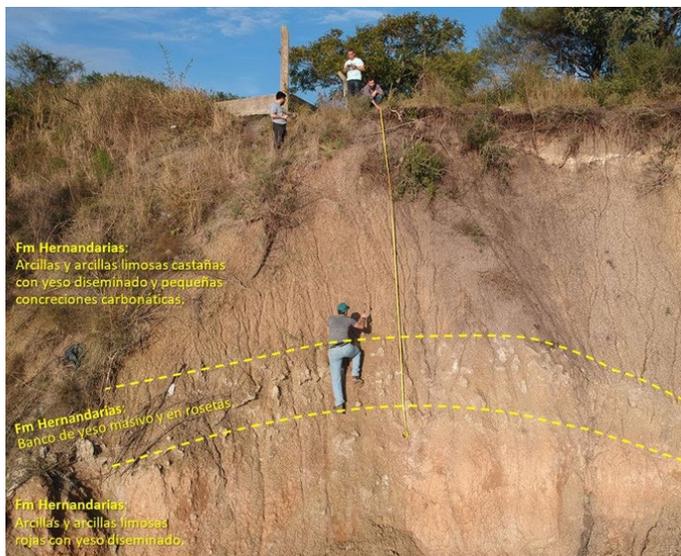


Figura 10. Sector medio de la Formación Hernandarias, compuesto por arcillas rojas con yeso diseminado. Un banco de espesor métrico de yeso masivo y en rosetas lo separa del sector superior, conformado por arcillas limosas castañas con yeso y concreciones carbonáticas.

Hernandarias conforman la “Unidad Hidrogeológica E” de Filí (2001). Por su parte, Santi et al. (2013), definen el Acuitardo Hernandarias, en consonancia con esta última formación.

Formación Tezanos Pinto (Pleistoceno): Iriondo (1980) designa así formalmente a los depósitos de loess amarillentos, constituidos por limo fino arcilloso, que coronan las barrancas, con espesores que por lo general no sobrepasan los 5 m. Cravero et al. (2018), correlacionan esta unidad con la Formación Punta Gorda. Si bien esta unidad no ha sido identificada en la zona bajo estudio, no se descarta su presencia en forma saltuaria. A partir de comentarios efectuados por personal que ha trabajado en las obras de sostenimiento del talud ejecutadas entre 2005 y 2010, podría llegar a emplazarse en forma lenticular en el sector superior de la barranca, oculta detrás del actual muro de sostenimiento, por encima de la cota 50 m; aunque también podría corresponder a un sector más limoso dentro de la Formación Hernandarias.

A pesar de no haber sido observada, y en referencia a la correlación efectuada por Cravero et al. (2018), cabe destacar que Iriondo (1980), al definir el Grupo Punta Gorda, excluyó expresamente a la Formación Tezanos Pinto. Sin embargo, las características descriptas por diferentes autores indican una mayor afinidad litológica de la Formación Hernandarias con Tezanos Pinto, que con General Alvear. Adicionalmente, los Sedimentos Pampeanos reciben diversos nombres según las diferentes localidades en las que han sido descriptos. Por estas razones, en el cuadro 1 se han dividido estas unidades con líneas punteadas, para referirse a las posibles correlaciones geológicas. Geotécnicamente, esta formación puede ser correlacionada con la “Unidad Geotécnica 1” de Franco et al.

(2002), definida en la localidad de Diamante y, regionalmente, con la “Unidad Hidrogeológica F” de Filí (2001).

CONFIGURACIÓN HIDROESTATIGRÁFICA DE LAS BARRANCAS DE VILLA HERNANDARIAS

Hidroestratigráficamente, la secuencia sedimentaria aflorante en las barrancas de Villa Hernandarias pertenece a lo que se conoce regionalmente como “Sección Epiparaniana”, en referencia a toda unidad que se encuentra por encima de la Formación Paraná.

Filí (2001), elabora una síntesis de las características hidrogeológicas de la región, determinando una serie de unidades hidrogeológicas, entre las cuales se presentan a continuación aquellas asociadas a las formaciones geológicas involucradas en las barrancas de Villa Hernandarias. Se hace mención, a su vez, a las unidades hidroestratigráficas sintetizadas por Santi et al. (2013) (Cuadro 1).

Unidad Hidrogeológica C: Está constituida por las arcillas verdes del miembro basal de la Formación Paraná, y unidades inferiores, con espesores totales que superan los 400 m. Su comportamiento hidráulico corresponde a un acuícludo, con permeabilidades del orden de 10⁻⁷ cm/s, con sectores acuíferos, con valores de 10⁻² cm/s, según AyEE (1976). El sentido general de escurrimiento es hacia el río Paraná. Esta unidad no aflora en la zona de interés.

Unidad Hidrogeológica D: En la zona bajo estudio, está constituida por las arenas de la Formación Ituzaingó, las cuales, según AyEE (1976), constituyen potentes estratos de arenas no saturadas, potencialmente acuíferas, y por las arenas de los miembros superior e intermedio de la Formación Paraná, no aflorantes. Durante períodos lluviosos pueden formarse pequeños acuíferos colgantes, de desarrollo areal discontinuo. El sentido de escurrimiento general es hacia el noroeste, con una independencia casi total de la red de flujo superficial.

En los trabajos de AyEE (1976), se estiman rangos de permeabilidades de entre 10⁻³ y 10⁻² cm/s. De Santi et al. (2013), dividen esta unidad en dos acuíferos confinados que denominan, en coincidencia con las unidades geológicas, Ituzaingó y Paraná, este último no aflorante en el sector estudiado.

Unidad Hidrogeológica E: Comprende a las formaciones General Alvear y Hernandarias, y podría correlacionarse con el “Pampeano” de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Filí (2001), divide a esta unidad en dos miembros, no coincidente con los límites formacionales. El miembro superior, con espesores medios de 5 a 10 m, presenta características

predominantemente acuitardas, y contiene un acuífero libre. El miembro inferior, más potente, va haciéndose acucluido en profundidad, actuando como capa confinante del acuífero principal, correspondiente a la Unidad D. Localmente, puede presentar permeabilidad secundaria. De Santi et al. (2013), por su parte, denominan Acuitardo Hernandarias, al contenido en la formación homónima.

Unidad Hidrogeológica F: Está conformada por los limos loésicos superiores de la Formación Tezanos Pinto y equivalentes, formando un acuífero libre. Filí (2001) refiere valores de permeabilidad de entre 10^{-4} y 10^{-3} cm/s; y menciona que, en áreas pobladas, las aguas de lluvia y residuales de la actividad humana se infiltran, saturando la zona de contacto con las arcillas de la Formación Hernandarias.

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PROPUESTA PARA LAS BARRANCAS DE VILLA HERNANDARIAS

Se propone una nueva zonificación geotécnica de las barrancas del río Paraná en la zona de Villa Hernandarias, sobre la base de su caracterización geológica, geomecánica, geohidráulica y geomorfológica. Al relevamiento efectuado en superficie, se adiciona el análisis de los resultados de ensayos de mecánica de suelos, sobre muestras obtenidas en cuatro perforaciones ejecutadas desde la cresta de las barrancas hasta el techo de la Unidad Geotécnica III (HYTSA 2019). Los parámetros geomecánicos de las unidades subyacentes han sido tomados de Franco et al. (2002) y AyEE (1976).

A continuación, se describen las unidades geotécnicas reconocidas, comenzando desde el coronamiento de las barrancas hacia el nivel del río Paraná (Cuadro 1). A modo de resumen, en el cuadro 2 pueden apreciarse las principales características aquí detalladas.

Unidad Geotécnica I: Corresponde al miembro superior de la Formación Hernandarias. Se ha incluido a la Formación Tezanos Pinto dentro de esta unidad, pese a no haber sido observada en el sitio, sobre la base de las características

descriptas por autores previos. Se estima que, de hallarse presente en la zona, esta última formación se emplazaría en forma saltuaria, coronando las barrancas, y con un comportamiento geotécnico semejante al del miembro superior de la Formación Hernandarias.

Esta unidad se caracteriza por su granulometría limo-arcillosa a arcillo-limosa, compacta, de color castaño a castaño amarillento, con presencia de yeso diseminado y pequeñas concreciones carbonáticas. En función de los resultados obtenidos de las perforaciones y ensayos de mecánica de suelos ejecutados por HYTSA (2019), y bajo un análisis conservador, pueden obtenerse los siguientes parámetros geotécnicos:

Espesor aproximado: 10 a 15 m

Clasificación SUCS: ML

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$

Ángulo de fricción: $\Phi_{uu} = 2^\circ$

Cohesión: $c_{uu} = 50 \text{ kPa}$

Estos parámetros son consistentes con los obtenidos por AyEE (1976), en tanto que el ángulo de fricción obtenido es algo inferior al informado por Franco et al. (2002).

Unidad Geotécnica II: Bajo esta denominación se agrupa al miembro medio e inferior de la Formación Hernandarias, incluyendo al nivel de yeso masivo y en rosetas detectado en el techo del primero. Se trata de arcillas de color rojizo y blanco, compactas, de moderada a alta plasticidad, con presencia de concreciones carbonáticas y yeso.

Espesor aproximado: 20 a 30 m

Clasificación SUCS: CH

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$

Ángulo de fricción: $\Phi_{uu} = 8^\circ$

Cohesión: $c_{uu} = 55 \text{ kPa}$

Unidad Geotécnica III: Involucra a las calizas, limos calcáreos y tobas calcáreas de la Formación General Alvear, junto con la sección superior de la Formación Ituzaingó, compuesta por areniscas ocres con cemento carbonático, estalactitas y tabiques calcáreos, producto de la disolución de la unidad superior. Presenta elevada resistencia y baja permeabilidad.

Cuadro 2. Resumen de parámetros geotécnicos de las unidades geotécnicas definidas.

Unidad Geotécnica	SUCS	Litología	Espesor aproximado [m]	Peso Específico Saturado (γ_{sat}) [kN/m^3]	Ensayo no consolidado no drenado	
					Ángulo de fricción (Φ_{uu}) [$^\circ$]	Cohesión (c_{uu}) [kPa]
I	ML	Limos arcillosos compactos	10 a 15	18	2	50
II	CH	Arcillas limosas plásticas	20 a 30	19	8	55
III	-	Calizas y areniscas cementadas	3 a 4	26	35	90
IV	SP	Arenas y areniscas muy friables	15 a 20	20	25	40

Espesor aproximado: 3 a 4 m

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 26 \text{ kN/m}^3$

Ángulo de fricción: $\Phi_{uu} = 35^\circ$

Cohesión: $c_{uu} = 90 \text{ kPa}$

Los parámetros de resistencia al corte han sido tomados de Franco et al. (2002).

Unidad Geotécnica IV: Arenas y areniscas muy friables, de color ocre, con estratificación entrecruzada, pertenecientes a la sección inferior de la Formación Ituzaingó. Presentan baja resistencia a la erosión fluvial. Representan la base de la barranca, continuando por debajo del nivel del río Paraná.

Espesor aproximado: 15 a 20 m

Clasificación SUCS: SP

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$

Ángulo de fricción: $\Phi_{uu} = 25^\circ$

Cohesión: $c_{uu} = 40 \text{ kPa}$

PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS ACTIVOS OBSERVADOS

A continuación, se describen los procesos geomorfológicos activos, que han sido reconocidos durante el relevamiento de campo, actuando específicamente sobre las barrancas. Es de destacar una relación evidente entre los procesos detectados y las unidades geotécnicas definidas (Cuadro 1).

Disolución, colapso y/o tubificación: Una de las primeras geoformas que llama la atención al analizar las imágenes satelitales de la región comprendida no solo por Villa Hernandarias, sino también su entorno hacia el Norte, Sur y Este, englobando las inmediaciones de Piedras Blancas, Pueblo



Figura 11. Vista aérea desde tomada desde un vehículo no tripulado de una laguna natural, sin aporte ni evacuación superficial, formada tentativamente por procesos de disolución, o bien por colapso o tubificación. Se ubica a 25 metros del borde superior de la barranca.

Brugo y zonas rurales aledañas, es la abundante propagación de lagunas subcirculares de origen natural, sin un aporte ni evacuación de agua superficial definida (Fig. 11). Su carácter superficial las ubica en la Unidad Geotécnica I, compuesta principalmente por arcillas, limos y yeso.

Si bien el estudio detallado de estas lagunas no forma parte del objeto del presente trabajo, se considera a nivel preliminar que las mismas podrían ser formadas por alguno de los siguientes procesos, o una combinación de ellos, comenzando por el que consideramos más probable:

1) Disolución del yeso, particularmente en los sectores donde presenta espesores cercanos al metro, lo que podría generar dolinas, de formas como las observadas. Vale mencionar que existen canteras de yeso en las inmediaciones, lo que da cuenta de su importancia.

2) Colapso de limos loessicos, en el caso que hubiese presencia de materiales colapsables en los niveles superiores de la Unidad Geotécnica I.

3) Dispersión de arcillas, en el caso que esta unidad tuviese algún nivel con contenido de arcillas dispersivas, si bien no se han encontrado referencias en los antecedentes consultados.

Independientemente de su génesis, es claro que, en la casi totalidad de los casos, las lagunas desaguan subterráneamente, siendo una fuente de infiltración hacia las capas inferiores. En los casos donde su emplazamiento es muy próximo a las barrancas, el aporte continuo de agua favorece los procesos de desestabilización (Fig. 12).

Cabe destacar que, durante los relevamientos efectuados, fueron detectados dos sumideros, que representarían un



Figura 12. Identificación de tres lagunas naturales subcirculares, formadas por disolución, o bien por colapso o tubificación, muy próximas a una zona de la barranca con presencia de depósitos de deslizamientos rotacionales y flujos de tierra. La laguna emplazada a la derecha de la imagen se corresponde con la de la figura 11.



Figura 13. Sumidero formado por disolución, colapso o tubificación, que representaría un estadio inicial en la formación de las lagunas subcirculares.



Figura 14. Sumidero con un grado de evolución algo más avanzado que el de la figura 13



Figura 15. Laguna en estado avanzado de formación, por proceso de disolución, o bien por colapso o tubificación, ubicada en la localidad de Piedras Blancas. Este proceso, en distintos grados de evolución, puede observarse en toda la región.

estadio de desarrollo incipiente, previo a las lagunas (Figs. 13 y 14). Por otra parte, en la zona de Piedras Blancas, se pudo observar una laguna en proceso avanzado de formación (Fig. 15). Finalmente, en el informe de mantenimiento de las obras de sostenimiento ejecutadas, fechado el 3 de marzo de 2014, y elaborado por la Municipalidad de Villa Hernandarias (Mesquida 2014), se informa la aparición repentina de una depresión circular, que podría haber sido disparada, según



Figura 16. Pozo circular de aparición repentina, cuya profundidad alcanza el nivel freático, documentado por Mesquida (2014).



Figura 17. Detalle de la presunta dolina de la figura 16.

el informe, por la desconexión de un conducto de desagüe (Figs. 16 y 17).

Carcavamiento: Las arcillas, arcillas limosas y limos arcillosos de las unidades geotécnicas I y II, presentan una muy baja resistencia a la erosión producto de la circulación de aguas superficiales. En aquellas zonas donde el agua, proveniente fundamentalmente de las lluvias o de desagües pluviales o domiciliarios con pérdidas, no es conducida adecuadamente, es común la formación de cárcavas, que se desarrollan verticalmente hasta alcanzar el nivel resistente de calizas de la Formación General Alvear (Unidad Geotécnica III) (Fig. 18). En algunos sectores de las barrancas, puede observarse incluso cómo esta erosión continúa evolucionando por debajo de los carbonatos. Este proceso se genera por infiltración del agua a través de las fisuras de las calizas, o bien por caída del agua en forma de cascada hacia las areniscas friables de la Formación Ituzaingó (Unidad Geotécnica IV). Estas areniscas poco consolidadas son fácilmente erosionadas



Figura 18. Desarrollo de cárcavas profundas a lo largo de la Formación Hernandarias.



Figura 21. Cono de deyección generado por caída de suelos desde el borde de la barranca.



Figura 19. Erosión fluvial por carcavamiento de las unidades geotécnicas I y II, con base en las calizas de la Unidad Geotécnica III. La erosión continúa sobre la Unidad Geotécnica IV, provocando el descalce y posterior caída de las calizas y arenas cementadas.



Figura 22. Deslizamiento rotacional desarrollado en el sector superior de la barranca, desarrollado dentro de la Unidad Geotécnica I.



Figura 20. Detalle del sector representado en la figura 19, donde se aprecian los tabiques calcáreos en voladizo, producto de la erosión de la matriz arenosa, correspondientes al sector superior de la Formación Ituzaingó (Unidad Geotécnica III). Los fragmentos calcáreos caídos al pie dan cuenta de la situación de equilibrio límite.

das, lo que genera un descalce de las calizas, que terminan cayendo por falta de sustento (Fig. 19). En algunos sectores, se puede apreciar cómo el agua erosiona las arenas, dejando



Figura 23. Deslizamiento rotacional profundo, que abarca las unidades geotécnicas I y II. En el sector superior izquierdo de la foto se puede apreciar la obra de sostenimiento, diseñada para evitar este tipo de procesos.

al descubierto el entramado de tabiques y estalactitas calcáreos del sector superior de la Formación Ituzaingó, que finalmente termina por colapsar (Fig. 20).

Conos de deyección: Estos se forman por caída de material fino y arenas, con escaso contenido de agua, desde el



Figura 24. Deslizamientos rotacionales profundos, con base en las calizas de la Unidad Geotécnica III, y posteriores flujos de tierra a partir del material deslizado. Se observa una laguna bajo la escarpa principal (derecha de la foto), que indica un estado de saturación del terreno.



Figura 25. Estancamiento de agua en la terrazuela de un deslizamiento rotacional, generado por el basculamiento que impide el adecuado drenaje superficial. Esta acumulación de agua puede generar posteriores flujos de tierra dentro del material fino deslizado.

borde de las barrancas hacia abajo, por acción de la gravedad, generando depósitos en forma de abanicos de elevada pendiente (Fig. 21). En el área bajo estudio, este proceso no reviste de una magnitud que requiera una especial atención.

Deslizamientos rotacionales: En la zona de estudio es frecuente encontrar depósitos de deslizamientos rotacionales a lo largo de toda la barranca, salvo en el sector intervenido por una obra de sostenimiento, lo que da cuenta de la efectividad de la misma en este sentido. Involucra a las unidades geotécnicas I y II, siendo las calizas de la Formación General Alvear (Unidad Geotécnica III) un límite físico para su desarrollo en profundidad. En algunos casos, se pudo observar que la superficie de deslizamiento no supera a la Unidad Geotécnica I (Fig. 22), mientras que los eventos de mayor desarrollo alcanzan la totalidad de ambas unidades (Fig. 23).

Si bien se ha registrado este proceso en múltiples secto-

res, en aquellos sitios donde se emplaza una laguna circular próxima a la barranca, las filtraciones desde la misma pueden actuar como disparadores de un evento de este tipo, ya que, al saturarse el terreno, se reduce el esfuerzo normal efectivo, disminuyendo la resistencia al corte.

Es habitual que este tipo de proceso forme parte de un movimiento complejo, que inicie como un deslizamiento rotacional, y posteriormente se forme un flujo de tierras en el pie (Fig. 24), favorecido por la acumulación de agua sobre los depósitos, que saturan el material fino (Fig. 25).

Flujos de tierra: Se generan como consecuencia de la saturación de los suelos finos de las unidades geotécnicas I y II, fundamentalmente asociados a eventos de lluvias intensas y, en forma puntual, a pérdidas en los sistemas de desagüe. Se trata de flujos densos no encauzados, de rápido desarrollo, cuyos depósitos forman lóbulos de material fangoso (Figs. 26 y 27). Es frecuente su desarrollo a partir de una removilización de depósitos finos de deslizamientos rotacionales (Fig. 28), que en algunos casos pueden ser promovidos por



Figura 26. Vista del frente de avance de un depósito de flujo de tierra, compuesto por arcillas saturadas.



Figura 27. Vista en planta de depósitos de flujos de tierra, al sur de la localidad de Villa Hernandarias.



Figura 28. Flujos de tierras, generados por removilización de depósitos finos saturados, generado previamente por deslizamientos rotacionales.



Figura 30. Flujo de tierras originado como evolución de un proceso de reptaje lento y continuo, que ocurre superficialmente en las arcillas de la Unidad Geotécnica I. Evento registrado por Mesquida (2014).



Figura 29. Depósitos asociados a movimientos complejos, producto de una secuencia de deslizamiento rotacional y posteriores flujos de tierra, a partir del material fino deslizado. La presencia de una laguna subcircular, posiblemente formada por disolución, o bien por colapso o tubificación, pudo haber favorecido la inestabilidad. En líneas de puntos se indican dos cauces que alimentaban la laguna previamente al deslizamiento.

la infiltración de agua desde lagunas próximas a la barranca (Fig. 29). También es habitual que evolucionen a partir de un proceso de reptaje, lento y continuo, acelerado por un incremento en las presiones intersticiales por sobresaturación del suelo (Fig. 30).

Reptaje: Se trata de un movimiento lento del terreno superficial que, en estado de saturación, avanza cuesta abajo como una oruga, generando la inclinación de los árboles y postes (Fig. 31), acumulando suelo en aquellos sectores donde se encuentra una barrera física (Figs. 32 y 33), y despegándose de la misma ladera abajo (Fig. 34). El movimiento es lento, pero constante, generando la fractura de losas, tuberías y cualquier estructura rígida que se apoye sobre la superficie o cercana a ella. A partir de un incremento en la



Figura 31. Árboles inclinados debido a un proceso de reptaje del suelo superficial en las cercanías de la cuneta colectora de cota 38.



Figura 32. Acumulación de suelo y vuelco de muro de contención, debido al reptaje lento, pero continuo del suelo.



Figura 33. Inclínación de árboles y acumulación de suelo sobre los mismos, debido al reptaje.

presión de poros del suelo, por un aporte excesivo de agua, debido a un evento de precipitaciones, o bien ante la rotura de una tubería debido al propio reptaje, este movimiento puede evolucionar muy rápidamente hacia un flujo de tierra (Fig. 30).

En la zona estudiada, este proceso se asocia a las unidades geotécnicas I y II, siendo de amplio desarrollo en la zona del puerto, por debajo de los muros de sostenimiento del talud superior (Figs. 35 y 36).

Caída de rocas: Este proceso se observa particularmente en la Unidad Geotécnica III. Se produce por socavación de las arenas no cementadas de la Unidad Geotécnica IV, que descalzan a los niveles superiores más rígidos, dejándolos en voladizo, hasta que finalmente caen por efecto de la gravedad, debido a la falta de sustentación. En algunos casos, el desmembramiento en bloques de los bancos de calizas o tobas calcáreas, durante la caída, genera depósitos que se asemejan a pequeñas avalanchas de rocas (Figs. 37 y 38). La erosión en las arenas se produce por efecto del agua que escurre superficialmente y que filtra a través de las fisuras de las calizas (Fig. 39). A su vez, ante una crecida del río Paraná, si bien el agua no alcanzaría el nivel de las calizas, podría erosionar el sector inferior de las arenas, generando una des-

estabilización de los sectores superiores.

Vuelco: El vuelco de rocas se da en macizos con presencia de discontinuidades que inclinan a contrapendiente, con un ángulo próximo a la vertical. Si bien no es el más frecuente en la zona de proyecto, este modo de fallo ha sido observado en la Unidad Geotécnica III, siendo evidente su desarrollo en la zona norte del área intervenida. En este sector, el movimiento se da en las areniscas atravesadas por estalactitas,



Figura 34. Reptaje de suelos. Puede apreciarse cómo el suelo “se despega” de la cara inferior del árbol, a diferencia de la cara superior, donde se acumula (figura 33).



Figura 35. El movimiento de reptaje del suelo ha dejado a la vista los pilotes inicialmente enterrados, que forman parte del sistema de sostenimiento de la ladera, en la zona del puerto.



Figura 36. El movimiento de reptaje del suelo ha descalzado la estructura rígida de sostenimiento, quedando apoyada en los pilotes. En algunos sectores, se observan asentamientos y basculamientos de la estructura.



Figura 37. Caída de bloques de calizas de la Formación General Alvear (Unidad Geotécnica III), por descalce producto de la erosión de las arenas infrayacentes de la Formación Itzaingó (Unidad Geotécnica IV).



Figura 38. Depósitos de caída de bloques de calizas, provenientes de la Unidad Geotécnica III.

las cuales se disponen con un alto ángulo a contrapendiente (Figs. 40 y 41).

Erosión fluvial: Las arenas escasamente consolidadas de la Unidad Geotécnica IV, en el sector más bajo de la barranca (Fig. 42), se encuentran en contacto con el río Para-

ná. Este material presenta una baja resistencia a la erosión fluvial, lo que facilita su remoción durante épocas de crecidas. Este proceso puede generar el descalce de las arenas y areniscas superiores, y un retroceso progresivo del frente inferior de la barranca, que favorezca la caída de rocas que lo sobreyacen, generando una onda desestabilizante hacia los sectores superiores.

CONCLUSIONES

Las barrancas del río Paraná, en el entorno de la localidad entrerriana de Villa Hernandarias, constituyen un claro ejemplo de cómo los procesos de remoción en masa pueden



Figura 39. Depósito de caída de rocas carbonáticas y areniscas cementadas de la Unidad Geotécnica III, por erosión de las arenas no cementadas de la Unidad Geotécnica IV. La erosión se debe al agua que escurre superficialmente desde el coronamiento de la barranca, generando el carcavamiento de las arcillas de la Formación Hernandarias. La Unidad Geotécnica III funciona en este caso como un nivel de base local, generando una cascada durante los períodos de lluvias, permitiendo la erosión de las arenas inferiores, y su consecuente descalce y colapso.



Figura 40. Vista aérea de banco de areniscas cementadas de la Formación Ituzaingó (Unidad Geotécnica III), atravesadas por estalactitas que inclinan a contrapendiente, con un alto ángulo respecto a la horizontal, en una situación de equilibrio límite.



Figura 41. Detalle de la figura 40, donde se aprecian las areniscas ocreas de la Formación Ituzaingó, atravesadas por tabiques calcáreos y estalactitas, que estructuran su estratificación, permitiendo el vuelco y posterior caída de rocas.

afectar zonas de llanuras densamente pobladas, alejadas de las regiones montañosas en donde suelen esperarse este tipo de eventos.

A lo largo de un segmento de unos 10 km de barrancas, fueron individualizadas geoformas de erosión y depositación asociadas a procesos de carcavamiento, caída de rocas y sedimentos, deslizamientos rotacionales, flujos de tierra, reptaje, vuelco y posible karstificación.

Los mecanismos que regulan la generación de cada uno de estos procesos han sido estudiados en función de las características litológicas, mecánicas e hidráulicas de los distintos materiales reconocidos, lo que permitió establecer una zonificación de las barrancas, definiendo cuatro nuevas unidades geotécnicas, denominadas, desde el coronamiento hacia la base de las laderas, I, II, III y IV.



Figura 42. Arenas y areniscas muy poco consolidadas de la Formación Ituzaingó (Unidad Geotécnica IV), altamente erosionables frente a una crecida del río Paraná.

De esta manera, ha sido posible determinar los distintos tipos de eventos de remoción en masa esperables en cada sector de la barranca, sirviendo como base para la elaboración de modelos de estabilidad y, eventualmente, posteriores diseños de sostenimiento y planes de ordenamiento territorial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional que, por intermedio de la Facultad Regional Buenos Aires, ha posibilitado la elaboración del presente trabajo, enmarcado en el proyecto de I+D+i MSPPABA0008251, titulado Caracterización de procesos de remoción en masa asociados a laderas de valles fluviales maduros.

A la empresa HYTSA, sin la cual no hubiese sido posible ejecutar las tareas de campo.

Finalmente, desean agradecer muy especialmente a los ingenieros David A. Menéndez Arán y Rodrigo J. Contreras por sus inestimables aportes durante la visita al sitio.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, F. 1976. Consideraciones bioestratigráficas sobre el Terciario Marino de Paraná y sus alrededores. *Acta Geológica Lilloana* 13(2): 91-108.
- Aceñolaza, F. 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. Instituto de Correlación Geológica. Universidad Nacional de Tucumán. Serie Correlación Geológica 22, 160 p., San Miguel de Tucumán.
- Aceñolaza, F. y Sayago, J. 1980. Análisis preliminar sobre la estratigrafía, morfodinámica y morfogénesis de la región de Villa Urquiza, provincia de Entre Ríos. *Acta Geológica Lilloana*, 15(2): 139-154.
- AyEE (Agua y Energía Eléctrica S.E.) 1976. Factibilidad Técnico - Económica Cierre Chapetón. Aprovechamiento Integral Paraná

- Medio. Jefatura de Estudios y Proyectos Paraná Medio. Tomo I. Estudios (inédito), 261 p.
- Bertolini, J., Bahler, G. y Zabalegui, M. 2008. La costa entrerriana del río Paraná. Un compendio de historia natural. En: CSIGA (eds.), Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 46 (1): 427-435.
- Bravard, A. 1858. Monografía de los terrenos marinos terciarios de las cercanías del Paraná. Imprenta del Registro Oficial, 107 p. Paraná. Reimpreso por la Imprenta del Congreso de la Nación, 1995, Buenos Aires.
- Caminos, R. 1979. Cordillera Fueguina. En: Academia Nacional de Ciencias, Geología Argentina 2: 1463.1501.
- Celli, A. 2015. Proyecto Río Santa Cruz. Obra Presidente Néstor Carlos Kirchner. Modelo geológico - geomorfológico preliminar. Informe ORSEP_03-15 (inédito), 12 p., Buenos Aires.
- Celli, A. 2022. Informe de asistencia técnica al Parque Nacional Iguazú. Relevamiento de las pasarelas del Circuito Inferior. Servicio Geológico Minero Argentino y Organismo Regulador de Seguridad de Presas, 23 p., Buenos Aires.
- Celli, A., Daels, L. y Severino, R. 2021. Movimientos en masa en las barrancas del río Paraná y brazos secundarios. Informe técnico. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (inédito), 53 p., Buenos Aires.
- Celli, A. y Rosa Vilardo, P. 2021. Caracterización de los procesos gravitacionales en las barrancas del río Paraná en Villa Hernandarias, Entre Ríos (resumen). 1° Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Actas: 113, Córdoba.
- Cravero, R., Fauqué, L., Oliva, J. y Tejedo, A. 2018. Informe Peligrosidad por Remoción en Masa. Barrancas de la Ciudad de Diamante, Provincia de Entre Ríos, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Instituto de Geología y Recursos Minerales, 39 p., Buenos Aires.
- Davis, W. 1899. The Geographical Cycle. The Geographical Journal 14(5): 481-504.
- De Alba, E. 1953. Geología del Alto Paraná en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 8(3): 129-161.
- Díaz, E., Dalla Costa, O. y Sanguinetti, J. 2005. Relaciones entre niveles acuíferos y deslizamientos de barrancas en Entre Ríos. Soluciones mediante sistemas drenantes. 10 p.
- Filí, M. 2001. Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos - República Argentina. Boletín Geológico y Minero, Vol. 112, Número Especial: 25-36.
- Franco, J., Cassano, A. y Bolla, G. 2002. Estabilidad de barrancas sobre el río Paraná. Modelado por métodos numéricos. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Paraná (inédito), 119 p.
- García Aráoz, E. y Celli, A. 2021. Informe de asistencia técnica al Parque Nacional Iguazú. Servicio Geológico Minero Argentino y Organismo Regulador de Seguridad de Presas, 47 p., Buenos Aires.
- Gentilli, C. y Rimoldi, H. 1979. Mesopotamia. En: Geología de la República Argentina. II° Simposio Academia Nacional de Ciencias I: 195-223. Córdoba.
- Herbst, R. 2000. La Formación Ituzaingó (Plioceno). Estratigrafía y distribución. En: Aceñolaza y Herbst (Eds.). El Neógeno de Argentina. Instituto Superior de Correlación Geológica. Universidad Nacional de Tucumán. Serie Correlación Geológica 14: 181-190. San Miguel de Tucumán.
- HYTSA Estudios y Proyectos S.A. 2019. Diseño ejecutivo de estabilización de barrancas de Hernandarias, defensa costera y conexión vial con Piedras Blancas en la provincia de Entre Ríos. Segundo informe de avance. Anexo 2. Estudio de suelos (inédito), 12 p.
- INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) 1996a. Intensidades máximas ocurridas en la República Argentina. Escala Mercalli Modificada. Mapa escala 1:5.000.000.
- INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) 1996b. Zonificación sísmica de la República Argentina. Mapa escala 1:5.000.000.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional) 2019. Modelos Digitales de Elevación. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Modelo-DigitalElevaciones/Mapa>
- Iriondo, M. 1973. Análisis ambiental de la Formación Paraná en su área tipo. Revista Asociación Geológica de Córdoba 2(1): 19-24.
- Iriondo, M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral 11: 125-141.
- Iriondo, M. y Rodríguez, E. 1973. Algunas características sedimentológicas de la Formación Ituzaingó entre La Paz y Pueblo Brugo, Entre Ríos. 5° Congreso Geológico Argentino: Actas I. Buenos Aires.
- Jones, D. 1993. Environmental hazards in the 1990s: problems, paradigms and prospects. Geography 78(2): 161-165.
- Mesquida, C. 2014. Obra de Estabilización de Barrancas, 1° etapa. Informe de daños ocasionados recientemente por las intensas y copiosas precipitaciones. Municipalidad de Villa Hernandarias (inédito), 6 p.
- Pereyra, F., García Aráoz, E., Kaufman, J., Balbi, A., Celli, A. y Tobío, M. 2023. Evaluación de la peligrosidad geológica en la cuenca del río Manso Superior. Parque Nacional Nahuel Huapi, provincia de Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino (inédito), 80 p.
- Ramos, V. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos (Ed.) Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29: 41-96.
- Reig, O. 1957. Posición de *Zygolestes paranensis* Ameghino y de *Zygolestes entrerrianus* Ameghino. Con una consideración de la edad y correlación del "Mesopotamiense". Hombergia. Revista del Centro de Estudiantes de Ciencias Naturales 5(12-13): 223-225.
- Rosa Vilardo, P. 2021. Caracterización geológica y geotécnica de las barrancas del río Paraná, Villa Hernandarias, Entre Ríos. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédito), 133 p., Buenos Aires.
- Russo, A., Ferello, R. y Chebli, G. 1979. Llanura Chaco Pampeana. En:

- Geología de la República Argentina. II° Simposio Academia Nacional de Ciencias I: 140-183.
- Santi, M., Bianchi, G. y Rezzónico, G. 2013. Acuíferos terciarios y cuaternarios. Provincia de Entre Ríos. República Argentina. En: González, N., Kruse, E., Trovatto, M. y Laurencena, P. (Eds.) Agua subterránea, recurso estratégico (1): 148-155. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 345 p.
- SEGEMAR 2023. Sistema de Información Geográfica Ambiental Minera. Servicio Geológico Minero Argentino. <http://sigam.segemar.gov.ar/visor>.
- SINAGIR 2018. PNRRD: Plan Nacional de Reducción del Riesgo de Desastres 2018 – 2023. Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo. Ministerio de Seguridad de la Nación, 77 p., Buenos Aires.
- Tujchneider, O. (2001). Sistemas hidrogeológicos en áreas de llanura: Cuenca inferior de los Saladillos, Provincia de Santa Fe. Universidad Nacional de Tucumán. Tesis Doctoral (inédita). 2 tomos.
- Vitulich, E. 1982. Descripción geológica de los depósitos yesíferos de la provincia de Entre Ríos (región Paraná – La Paz). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Tesis doctoral (inédita), 98 p.