
CAPÍTULO 1

Las huellas del agua

CAPÍTULO 1

SILVINA MARIELA OCAMPO

Dpto. Geología, FCNyCS-UNPSJB
ocampomariela@gmail.com

NICOLÁS FOIX

Dpto. Geología, FCNyCS-UNPSJB y CONICET
nicofoix@hotmail.com

JOSÉ MATILDO PAREDES

Dpto. Geología, FCNyCS-UNPSJB
paredesjose@yahoo.com

PALABRAS CLAVES

INUNDACIONES
RELIEVE
REDES DE DRENAJE
COMODORO RIVADAVIA

Las huellas del agua

GLOSARIO

BASALTOS: Rocas volcánicas oscuras originadas por magmas de alta temperatura (1000-1200°C), poco viscosos, frecuentes en las mesetas de la Patagonia.

CÁRCAVA: Forma erosiva originada por corrientes de agua, de forma estrecha y profunda.

CABECERA: Zona alta de una cuenca de drenaje donde dominan los procesos de erosión, caracterizada por altas pendientes.

CEMENTACIÓN: Precipitación de minerales a partir de soluciones saturadas, dentro del espacio poral de sedimentos y rocas. Otorga mayor dureza a los materiales.

CONSOLIDACIÓN: Proceso por el cual un sedimento adquiere mayor dureza, generalmente implica compactación y/o cementación.

COQUINAS: Rocas sedimentarias compuestas por restos de fósiles marinos, con diverso grado de fragmentación.

FLUJO: Mezcla de agua y sedimentos que se desplaza en una corriente pendiente abajo, donde los mecanismos de transporte de las partículas dependen de la relación agua/sedimento.

FRIABLE: Cualidad de una roca o sedimento de ser fácilmente erosionado. Depende principalmente del origen e historia evolutiva del material.

GEOFORMA: Formas de erosión o acumulación reconocidas en el paisaje sobre rocas o sedimentos, originadas por la acción de agentes naturales (vientos, corrientes de agua, oleaje, glaciares, etc.).

GEOMORFOLOGÍA: Ciencia o disciplina dedicada a estudiar la evolución del relieve y las formas del paisaje.

LITORAL: Referido al sector adyacente al mar, zona costera.

MESETA: Forma plana y sobre-elevada del relieve, muy frecuente en la Patagonia extra-andina.

METEORIZACIÓN: Alteración física y/o química de la superficie de una roca o sedimento por la acción de agentes atmosféricos.

PLIOCENO: Época geológica del período Neógeno (Era Cenozoica), definido entre los 5.33 y 2.58 millones de años (según la International Commission on Stratigraphy).

PLEISTOCENO: Época geológica del período Cuaternario (Era Cenozoica), definido entre los 2.58 y 0.0117 millones de años (según la International Commission on Stratigraphy).

REMOCIÓN EN MASA: Movimientos de suelos, sedimentos o rocas por acción de la gravedad. Pueden ser lentos o rápidos, e incluye una amplia variedad de procesos geomorfológicos (deslizamientos, caídas de rocas, reptación, etc.).

SUSTRATO: Material pre-existente sobre el cual se acumulan nuevos sedimentos.

TERRAZA ESTRUCTURAL: Término geomorfológico utilizado para denominar a zonas planas o de baja pendiente originadas por niveles resistentes a la erosión (ej. rocas sedimentarias bien cementadas).

RESUMEN

La inundación ocurrida en Comodoro Rivadavia durante la tormenta de marzo-abril de 2017 generó enormes daños materiales en la ciudad. Las cuencas de drenaje sobre las cuales está establecido gran parte del ejido urbano tienen sus cabeceras sobre el borde oriental de la Pampa del Castillo (700-750 msnm) y desaguan al mar (ej. Arroyo La Mata, Belgrano, Km. 8). El relieve de la zona muestra topografías inusualmente elevadas para regiones costeras no montañosas, con pendientes promedio que son decenas de veces más elevadas que otros sistemas fluviales patagónicos. Esta particularidad explica la elevada energía alcanzada por el agua durante el temporal. Por otro lado, se pudo comprobar que los mayores daños por erosión profunda tuvieron lugar donde corrientes de alta energía escurrieron sobre depósitos arenosos fluvio-eólicos no consolidados, dispuestos en fondos de valles o laderas (por ej. barrios Laprida, General Mosconi y cabecera del Arroyo de la Quinta). Los procesos de acumulación sedimentaria tuvieron lugar en el mar en forma de deltas o en depresiones ubicadas dentro de la ciudad (ej. barrios Juan XXIII y Pueyrredón sector sur). Los efectos de la tormenta también se vieron reflejados en movimientos de remoción en masa de diverso tipo (ej. deslizamientos y flujos de tierra), constituyendo otros factores de riesgo para la población. Algunas estimaciones realizadas permitieron reconocer que los sectores de la ciudad que más rápidamente se inundan durante las lluvias repentinas coinciden con cuencas de drenaje de reducido tamaño y altas pendientes (ej. barrio General Mosconi). También se pudo comprobar que en muchos casos el impacto de las inundaciones se vio acentuado por la existencia de obras civiles ineficientes.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales catastróficos en zonas habitadas generan secuelas de diversa naturaleza y consideración, que dependen tanto de la violencia del suceso como de la vulnerabilidad socio-económica de la población afectada. Los daños van desde los más evidentes (pérdidas de vidas humanas, daños materiales en espacios públicos y privados, situaciones sanitarias de riesgo, etc.) hasta otros menos visibilizados (traumas psicológicos, dramas familiares, problemáticas sociales, etc.). Sin embargo, los desastres naturales también ponen a prueba el tejido social de las poblaciones afectadas y lo interpelan de manera violenta, forzando el fortalecimiento y la creación espontánea de vínculos sociales a través de la solidaridad. Por otro lado, a pesar que la Geología es una ciencia natural abocada a entender la evolución de nuestro planeta y es más conocida por su importancia económica en la búsqueda y desarrollo de recursos naturales (ej. minerales e hidrocarburos), también juega un rol destacado en relación con la sociedad. Por ello, la carrera de Geología fue declarada de interés público en 2008 en nuestro país (Boletín Oficial N°31.502), ya que su ejercicio puede

afectar de manera directa la salud, la seguridad y los bienes de los habitantes.

La tormenta ocurrida en Comodoro Rivadavia en marzo-abril de 2017 conmocionó a la ciudad, constituyendo unos de los desastres naturales más importantes de su historia. El agua fue el protagonista de la catástrofe y sus huellas quedaron en su tierra (y su gente), cavando enormes zanjones que destruyeron calles, casas y puentes, o transportando y depositando enormes cantidades de tierra (sedimentos) dentro de algunos barrios. Por ello, un grupo de docentes y alumnos de la carrera de Geología (Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud) trabajaron desinteresadamente con el objeto de poner a disposición de los entes de gobierno y de la población en general información técnica valiosa en relación al tema. “Las huellas del agua” es sólo una parte de ese trabajo, que aborda en particular el análisis del paisaje en el ámbito urbano y peri-urbano de Comodoro Rivadavia, uno de los principales factores de control en las inundaciones de 2017. La importancia del estudio no sólo radica en comprender las causas, consecuencias, intensidad y ubicación de los daños producidos en relación con las formas del paisaje, sino también pretende ser un aporte en la toma de decisiones durante la planificación urbana y constitución de protocolos de emergencia.

EL RELIEVE PATAGÓNICO EXTRAANDINO

Unos de los rasgos más notables de la Patagonia extra-andina son los amplios relieves planos sobre-elevados, denominados mesetas. Estos rasgos del paisaje patagónico llamaron la atención de uno de los naturalistas más influyentes de la historia de la humanidad, Charles Darwin, durante su viaje a bordo del mítico Beagle en la primera mitad del siglo XIX por las costas de nuestra región (Darwin 1846). Las dimensiones que alcanzan estas mesetas en la Patagonia (miles de kilómetros cuadrados) le otorgan una importancia muy destacada, ocupando un porcentaje significativo del total de la superficie. Algunos de estos relieves mesetiformes conforman rasgos geográficos muy conocidos, como son la meseta de Somuncurá (Río Negro), Pampa del Castillo (Chubut), Meseta Espinosa (Santa Cruz), entre otros. Las rocas que “coronan” las mesetas pueden ser de diversa naturaleza y antigüedad, pero en todos los casos corresponden a materiales “duros” o difíciles de erosionar, es decir, que se oponen al desgaste por parte de agentes naturales como son la acción del viento y del agua. El proceso por el cual se originan los relieves mesetiformes en Patagonia se denomina “inversión de relieve” (Césari y Simeoni 1994; Simeoni 2008; Ocampo y Foix 2012; Martínez et al. 2014), causado por la importante erosión hidroeólica producida en un clima desértico con fuertes vientos (Mazzoni y Vázquez 2009; Chartier et al. 2009).

En la región sureste de Chubut y noreste de Santa Cruz se destaca un conjunto de relieves mesetiformes coronados por rocas sedimentarias gravosas, conocidos como Rodados Pa-

tagónicos (ej. Pampa del Castillo, Meseta Espinosa y Pampa de Salamanca). Estas terrazas estructurales corresponden a antiguos valles fluviales por donde transitaban caudalosos ríos, producto de la fusión de grandes masas de hielo ubicadas en la zona cordillerana hace 2-1 millones de años (Césari y Simeoni 1994; Simeoni 2008). En su carga transportaron gravas de diferentes tamaños y arenas, labrando su curso sobre un relieve pre-Plioceno (Fig. 1A). Al desactivarse el sistema fluvial e instalarse un clima más árido en la región, las zonas topográficamente más elevadas fueron afectadas por los agentes erosivos hidroclimáticos, generando el desgaste de las mismas (Fig. 1B). El relleno del valle fluvial actúa protegiendo de la erosión a las rocas que se encuentran por debajo, produciéndose con el tiempo, la inversión del relieve como ocurre con la Pampa del Castillo.

RELIEVE COSTERO CERCANO A COMODORO RIVADAVIA

Las mesetas son un protagonista fundamental del paisaje próximo a Comodoro Rivadavia. La Pampa del Castillo y Pampa de Salamanca se disponen en sentido suroeste-noreste a unas pocas decenas de kilómetros de la costa (Fig. 2). Sobre su faldeo oriental pueden observarse numerosos cañadones que van desde la parte más alta de las mesetas hasta alcanzar el mar. Muchos de ellos tienen nombres familiares para los que vivimos en la ciudad: cañadón El Trébol, Tordillo, Perdido, Ferrais, Casa de Piedra, entre otros (Fig. 3). Algunos de estos cañadones fueron aprovechados para construir sobre ellos los principales accesos a la ciudad (ruta Nac. N°26 en el cañadón El Trébol, ruta Prov. N°39 sobre cañadón Casa de Piedra y ruta Nac. N°3 sobre el cañadón Ferrais). Por esto, en términos regionales podemos

decir que el paisaje de la zona contiene dos elementos principales: 1) Meseta Pampa del Castillo, que comprende la planicie elevada situada al oeste de la ciudad y 2) Zona de cañadones que descienden hacia el mar.

1. La Meseta Pampa del Castillo es el rasgo topográfico de mayor elevación del sector sureste de la provincia de Chubut, alcanzando 757 metros sobre el nivel del mar cerca del límite provincial con Santa Cruz. Este nivel mesetiforme va disminuyendo su altitud en dirección noreste y toma otros nombres, como Pampa de Salamanca y Meseta de Montemayor. La Pampa del Castillo constituye un nivel de gravas arenosas de origen fluvio-glaciar (Césari y Simeoni 1994).
2. Los sistemas de drenaje que descienden hacia el mar, tienen su origen en la Pampa del Castillo, que representa la divisoria de aguas regional más importante en la región. Los cursos fluviales van desgastando lentamente las rocas que encuentran en su paso, transportan esos sedimentos y los depositan en los sectores más bajos, de menor pendiente y energía del agente. Este proceso genera el paisaje recortado o disectado por cañadones que caracteriza la faja litoral local, denominado en términos geomorfológicos relieve estructural disectado (Sciutto et al. 2008).

Nuestro paisaje costero puede parecer despojado de rasgos propios destacados en relación con otras zonas comparables, pero sin embargo no es así. Estamos acostumbrados a tener que subir 750 m para salir de la ciudad (hacia el norte o al oeste), pero esta situación no se repite en otras costas del país (ej. Provincia de Buenos Aires). Existen pocos lugares en el mundo, fuera de relieves montañosos orogénicos (ej.

¿Qué es la inversión de relieve?

Las rocas que hoy se encuentran dispuestas en la parte alta de las mesetas, en algún momento del pasado geológico estuvieron en las posiciones más bajas. Para entenderlo mejor imaginemos un relieve cualquiera labrado sobre rocas friables, sobre el cual se acumulan en las partes más deprimidas sedimentos/rocas que alcanzarán luego mayor dureza relativa (Fig. 1A). El accionar erosivo del agua y viento por muchos miles o millones de años genera un mayor desgaste de las rocas friables en comparación con las más resistentes (erosión diferencial), transformando en bajas las zonas altas y viceversa (Fig. 1B). Las rocas "duras" más frecuentes que coronan las mesetas son basaltos (ej. Meseta de Somuncurá, Meseta Cuadrada, Meseta de Canquel, entre otras) y rocas sedimentarias gravosas bien consolidadas-cementadas (Pampa del Castillo, Pampa de Salamanca, Meseta de Montemayor, entre otras) (Fig. 1).

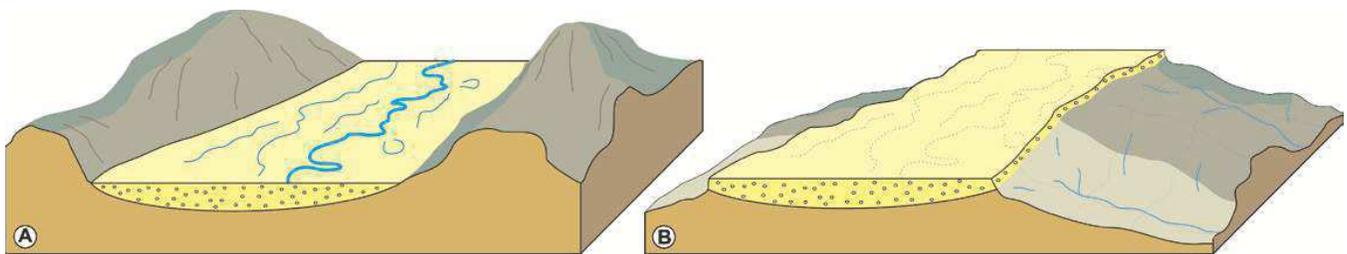


Figura 1. Inversión de relieve en mesetas de grava. (A) Depositación de sedimentos fluviales gravosos en amplios valles sobre un relieve pre-existente. (B) Erosión de las rocas más friables que no fueron cubiertas o "protegidas" por los mantos de grava.

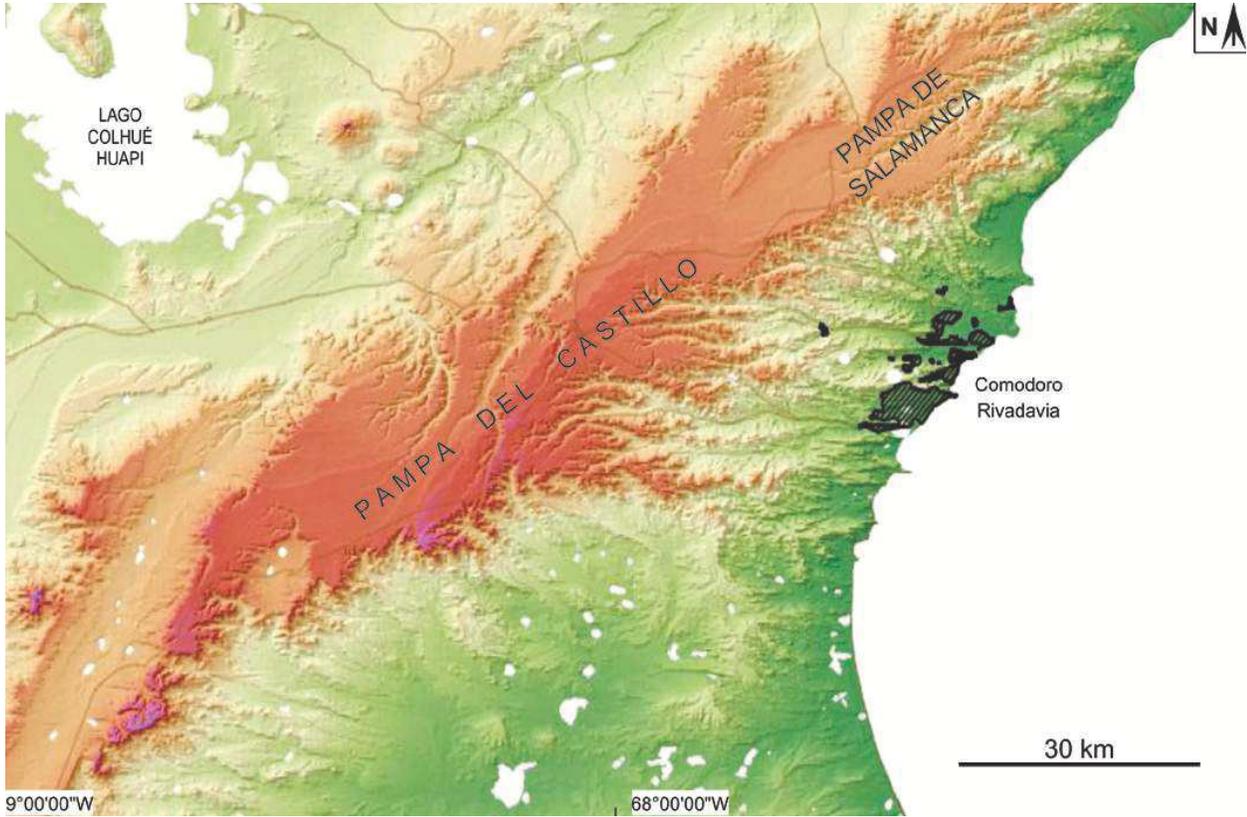


Figura 2. Modelo digital de elevación SRTM p229r092 que muestra las alturas máximas en color rosado de la meseta Pampa del Castillo y su extensión hacia el noreste como Pampa de Salamanca. Fuente de archivos vectoriales: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina.



Figura 3. Ubicación de los cañones que descienden desde la Pampa del Castillo al mar. Alrededores de Comodoro Rivadavia (Chubut). Fuente Hojas Topográficas Escalante 4569-IV y Comodoro Rivadavia 4566-III del Instituto Geográfico Militar año 1953, escala 1:250.000.

los Andes en Chile, Perú, etc.), que tengan topografías tan elevadas en sectores costeros. Esto le confiere una de las particularidades más importantes a nuestra región: las altas pendientes. En esta cualidad está implícita la respuesta a muchos de los efectos que vimos durante la tormenta de 2017, ya que la energía del agua en los sistemas fluviales depende directamente de la pendiente por la que escurre. Para tomar dimensión de lo particular de nuestra región apelaremos a una simple comparación: la cuenca del Arroyo Belgrano viaja desde lo alto de la Pampa del Castillo hasta desaguar en el mar en proximidades del barrio Presidente Ortiz (Km. 5) de Comodoro Rivadavia, recorriendo un total de 40,3 km, con un desnivel de 713 m (Fig. 4). Por su parte, el río Limay nace en el lago Nahuel Huapi, en el sector cordillerano próximo a la localidad de San Carlos de Bariloche y sus aguas alcanzan el océano Atlántico, en Carmen de Patagones luego de formar el Río Negro y recorrer 1250 km, con un desnivel de 764 m (Fig. 4). Es decir que ambos sistemas fluviales tienen un desnivel comparable, pero el río Limay + Negro reparten esa diferencia de altura a lo largo de 1250 km y el Arroyo Belgrano lo hace en una distancia 25 veces más corta, lo que se traduce en una pendiente 25 veces mayor. Pero como si esto fuera poco, la cuenca del Arroyo Belgrano es una de las que tiene menor pendiente dentro de las que surcan nuestra ciudad (Fig. 5).

Lo que sucede en nuestra región es que en su mayoría los sistemas fluviales son efímeros, es decir que no traen agua de forma permanente debido al clima árido de la Patagonia; sin embargo, cuando llueve de forma extraordinaria como en marzo-abril de 2017 la energía del agua es proporcional a las pendientes de la zona. Los cursos fluviales erosionan y exponen las rocas sedimentarias que se encuentran por debajo. En el trayecto de cualquier curso fluvial hay una sectorización donde predominan unos procesos sobre otros. Las variables más importantes para que esto suceda son la pendiente y la velocidad del agua del curso. En las zonas de las cabeceras, predomina la erosión, las pendientes son más elevadas por lo cual el agua que ingresa en este sector toma mayor velocidad y tiene mayor poder erosivo (Fig. 6). Cuando las pendientes van disminuyendo, la velocidad del agua también lo hace y el poder de erosión también disminuye. En este sector predomina el transporte de los fragmentos de roca que se desprendieron en el sector anterior (Fig. 6). La velocidad del agua va decreciendo a medida que se acerca a su nivel de base (mar) y al tener menos velocidad por la disminución de la pendiente, también disminuye su capacidad de transportar la carga del sedimento. Incapaz de seguir transportando el sedimento que trae en suspensión, lo deposita (Fig. 6).

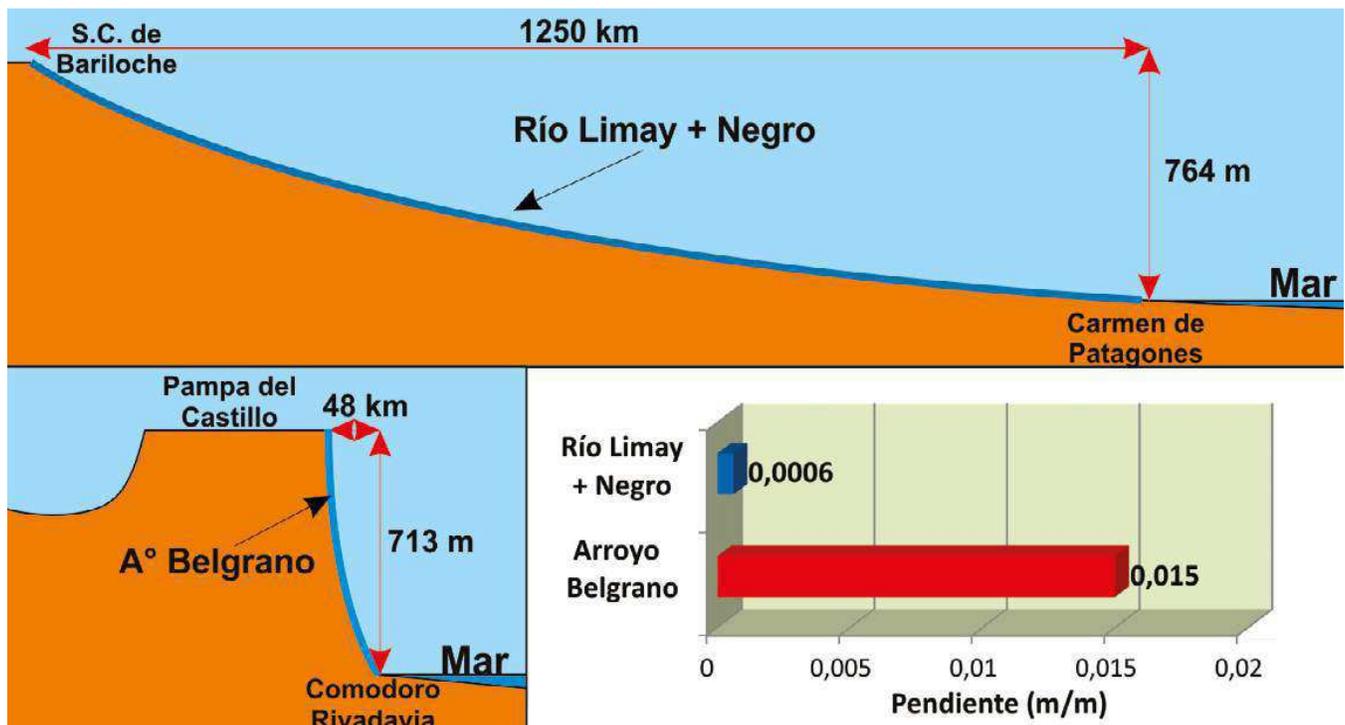


Figura 4. Comparación de pendientes entre el Río Limay + Negro y el Arroyo Belgrano. Los desniveles son comparables para ambos cursos fluviales. Las distancias horizontales son proporcionales entre sí. Escala vertical exagerada.

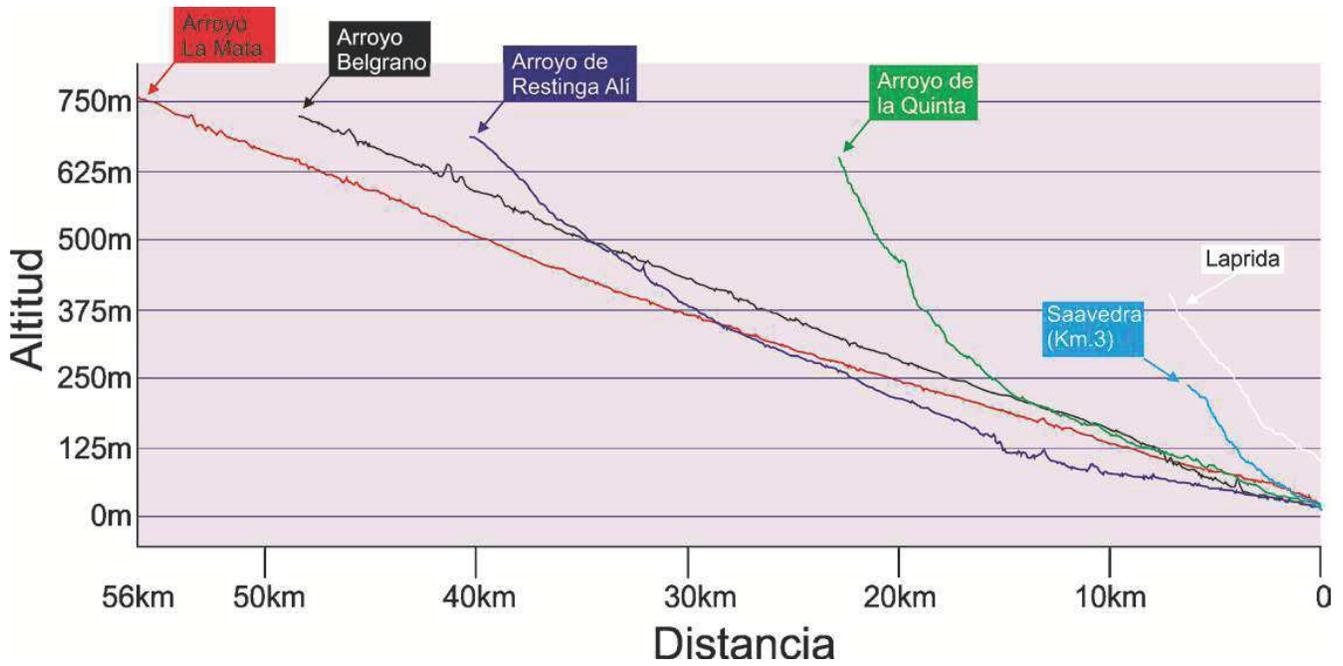


Figura 5. Relaciones distancia vs altura del cauce principal de mayor longitud de las cuencas de drenaje analizadas (Paredes et al. 2017).

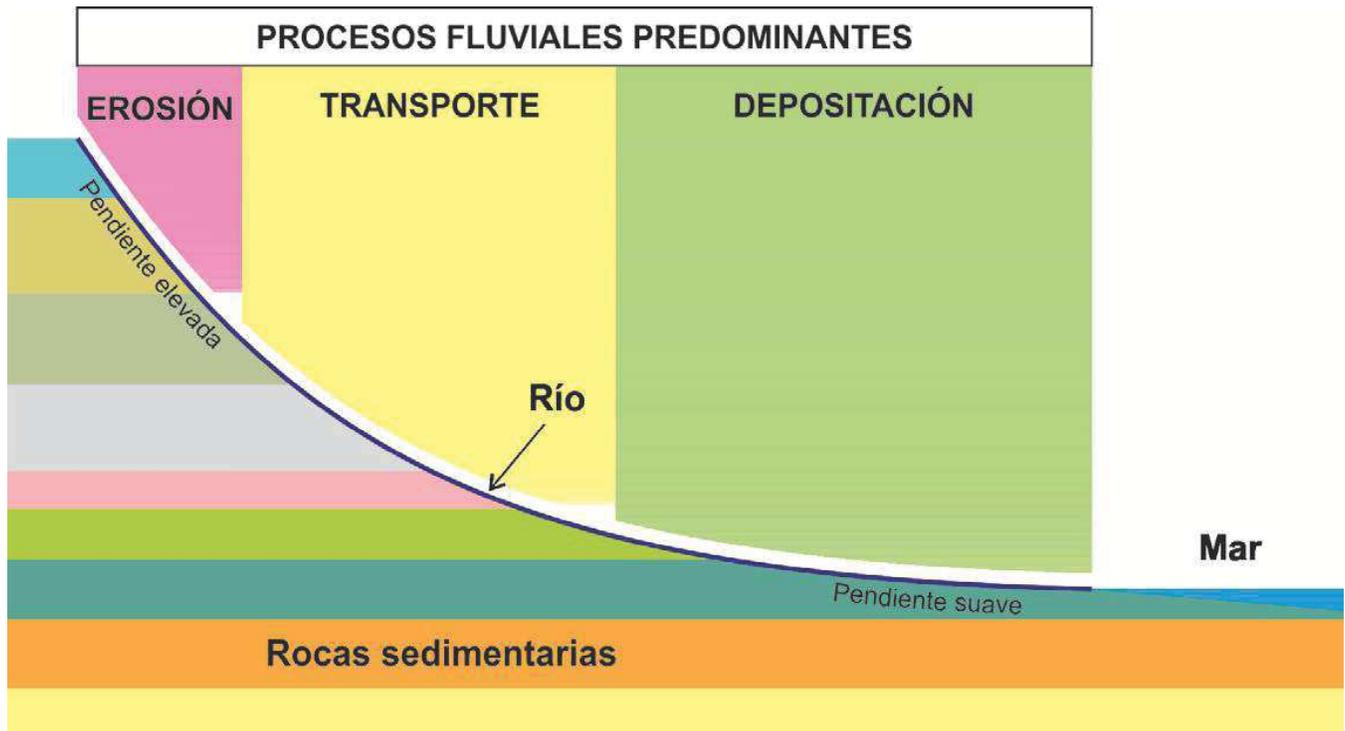


Figura 6. Esquema de los procesos fluviales predominantes en perfil longitudinal de un río que desemboca en el mar. En su trayecto el curso va disectando capas o estratos de rocas sedimentarias que en este caso se suponen homogéneas en cuanto a la resistencia a la erosión.

PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS Y GEOFORMAS

En términos generales podemos decir que los agentes naturales (viento, corrientes fluviales, acción de las olas) generan geoformas de erosión y de acumulación. Durante la tormenta de 2017 en Comodoro Rivadavia, las intensas lluvias pusieron en funcionamiento numerosas geoformas, que a continuación detallaremos.

a. Cárcavas (erosión sustrato-controlada)

Tal como vimos antes, la capacidad de erosión de un flujo acuoso depende principalmente de su energía. Sin embargo, las consecuencias de esta corriente de agua dependen de la resistencia que le opone el sustrato sobre el cual se ejerce la erosión, es decir, que la energía del flujo es condición necesaria pero no suficiente para generar erosión. En el caso de Comodoro Rivadavia, debemos distinguir que el sustrato sobre el cual se ha edificado la ciudad depende del sector en cuestión. En algunos casos las edificaciones están sobre rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Chenque y Sarmiento, y en otros sobre sedimentos fluvio-eólicos no consolidados. Esta distinción entre rocas sedimentarias (mayor dureza y resistencia) y sedimentos (no consolidados, friables) es muy importante para entender los daños causados en la tormenta. Usaremos el caso del Barrio Laprida como ejemplo, donde los daños sobre la calle Honduras fueron retratados por los medios de comunicación de todo el país. En ese sector de la ciudad se desarrollan muy altas

pendientes sobre rocas de la Formación Chenque (ver más adelante Subcuenca Laprida). Sin embargo los daños por carreamiento fueron mínimos en los tramos que el agua transitó por encima de estas rocas, ya que su elevada dureza relativa no lo permitió (Fig. 7A). Por el contrario, cuando el agua alcanzó las zonas más bajas de la ladera y el fondo del valle, donde se disponen potentes depósitos arenosos no consolidados (friables), tuvieron lugar los mayores daños (Fig. 7B).

b. Flujos de tierra

Son movimientos de remoción en masa que ocurren de forma rápida. El movimiento descendente se inicia por la pérdida de cohesión de las partículas del suelo saturadas con agua, sobre laderas con pendientes importantes. Se desarrolla en la porción superficial del suelo o material inconsolidado, que no supera el metro de profundidad (Tarbuck et al. 2005). El material transportado se comporta como un flujo y el depósito final presenta formas lobuladas.

Durante el temporal de 2017, sobre las laderas de las terrazas estructurales que se presentan en el ámbito de la ciudad, se generaron numerosos flujos de tierra (Fig.8). La cantidad de agua caída saturó el material dispuestos sobre las laderas (suelo + sedimentos) e incrementó su peso, desencadenando su inestabilidad gravitacional. Estas formas permiten reconocer con facilidad la zona de arranque o cicatriz, la zona de transporte y el depósito final (Fig.8).

c. Deslizamientos

Al igual que los flujos de tierra, los deslizamientos son movimientos de tierra rápidos que se producen por la acción gravitatoria. La diferencia es que no sólo involucran la cubierta superficial, sino también a grandes volúmenes de roca. La combinación de laderas con pendientes elevadas, materiales arcillosos y agua, generan un ambiente de desestabilización ante las fuerzas de gravedad. Estos movimientos se encuentran entre los de mayor peligrosidad geológica debido a los volúmenes de tierra que involucra y a las altas velocidades a las que ocurre. Previo al movimiento desencadenante final del deslizamiento, se observan rasgos que conducirán a la desestabilización.

En superficie es frecuente encontrar grietas de descompresión paralelas a las laderas. El agua promueve el movimiento aportando peso al volumen desestabilizado y disminuyendo la fricción entre las partículas. Las grietas superficiales sirven como vías de conducción del agua en profundidad. Es decir que existe una preparación previa del material por meteorización hasta que pierde cohesión inicial y por acción de su propio peso se separa y desliza pendiente abajo.

En nuestra región los deslizamientos han sido frecuentes e importantes, muchos de los cuales se encuentran dentro de la ciudad (Fig. 9A). El más recordado de todos quizás fue el del año 1995, ocurrido sobre la ladera oriental del Cerro Chenque y que cortó la ruta Nac. N°3 (Fig. 9B). El último

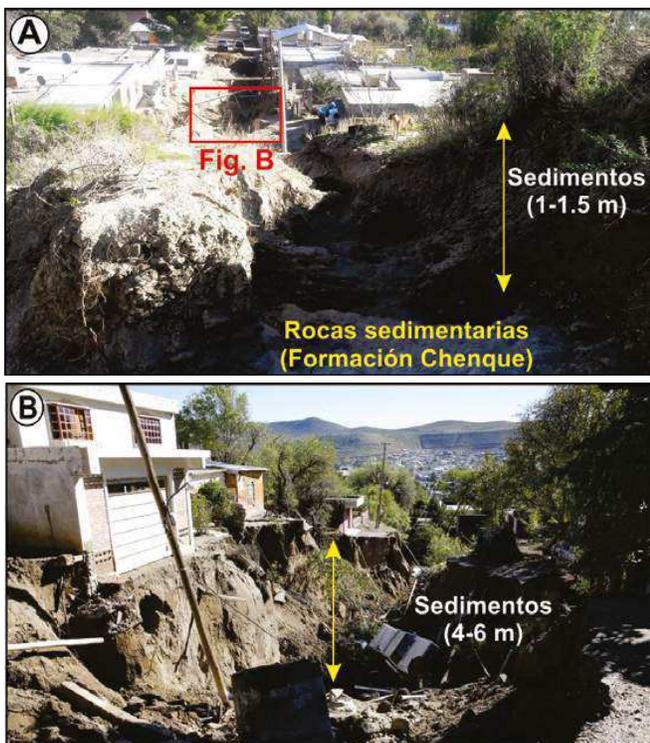


Figura 7. Daños por erosión en la calle Honduras del barrio Laprida. (A) Cárcava de 1-1.5 m de profundidad sobre la ladera sobre la calle Honduras. El agua erosionó hasta alcanzar las rocas de la Formación Chenque (control del sustrato). (B) Cárcava labrada sobre sedimentos no consolidados (Fuente Diario La Nación).

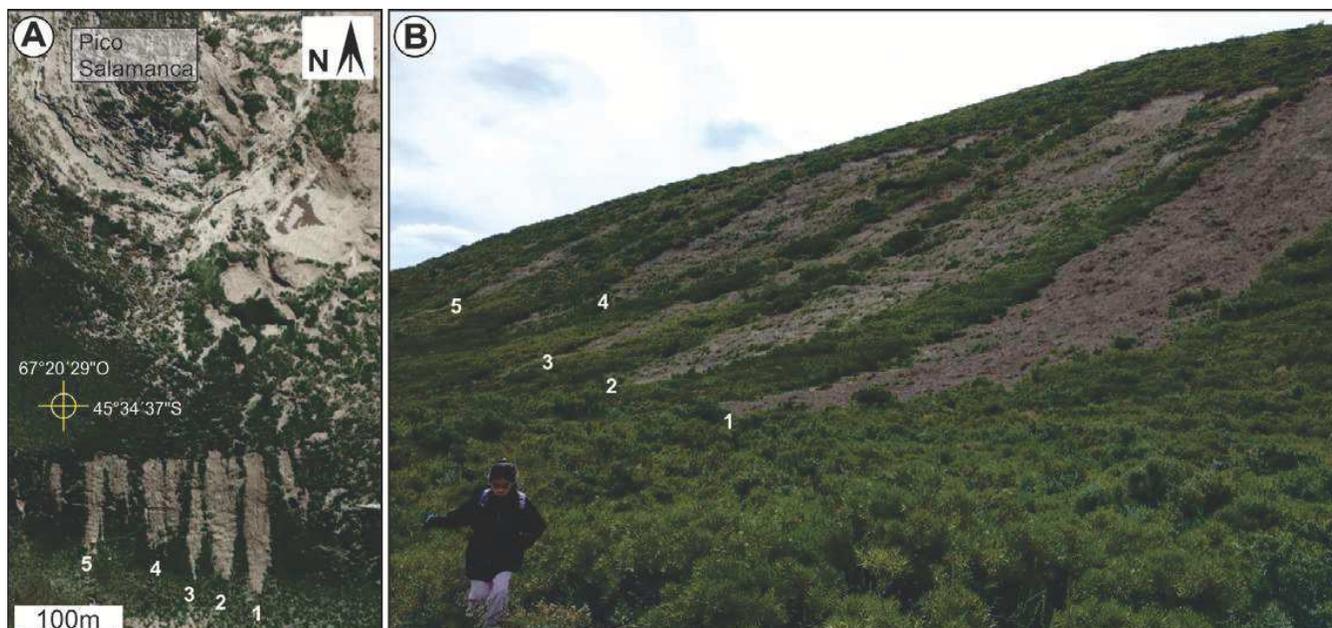


Figura 8. Flujos de tierra en la ladera sur del Pico Salamanca, desencadenados por las lluvias de marzo-abril 2017. (A) Imagen de Google Earth™. (B) Fotografía de campo.



Figura 9. (A) En rojo se indica la posición, tamaño y fechas aproximadas de deslizamientos en los barrios General Mosconi, Saavedra, San Martín y centro. (B) Deslizamiento del Cerro Chenque del año 1995. Tapa de la Carta de Peligrosidad Geológica 4566 - III. SEGEMAR.

deslizamiento ocurrió el día 11 de abril del año 2017, en el cerro Vitteau (zona de la caballeriza) en Km 3, unos pocos días después del temporal climático (Fig. 10). A pesar que las condiciones de elevada pendiente, meteorización y fracturamiento fueron las causas que provocaron el deslizamiento, la cantidad de lluvia caída fue el factor desencadenante (Vidal 2018). La urbanización al pie o sobre faldeos inestables similares implica condiciones de elevado riesgo geológico.

d. Deltas y playas

Los deltas son acumulaciones de sedimentos que tienen lugar en la desembocadura de sistemas fluviales en el mar. De manera sencilla, puede imaginarse que corresponde sectores donde el continente “avanza” sobre el mar de manera natural. Como los sistemas fluviales que surcan la ciudad no

traen agua durante largos períodos de tiempo, los deltas son formas de depositación que no suceden habitualmente. Sin embargo, la reactivación violenta de los sistemas fluviales efímeros durante la tormenta llevó grandes cantidades de agua y sedimentos hasta el mar a través de sus principales cursos, dando origen a sistemas deltaicos de forma casi instantánea (Fig. 11).

Hoy en día estas formas de acumulación han desaparecido, porque el accionar de las olas se encargó de redistribuir esos sedimentos a lo largo de las playas. Por ello, la ubicación de muchas playas en nuestro sector se relaciona en forma directa a cursos fluviales de sistemas efímeros que desembocan en el mar, ya que han sido quienes le han aportado el sedimento (Fig. 12).

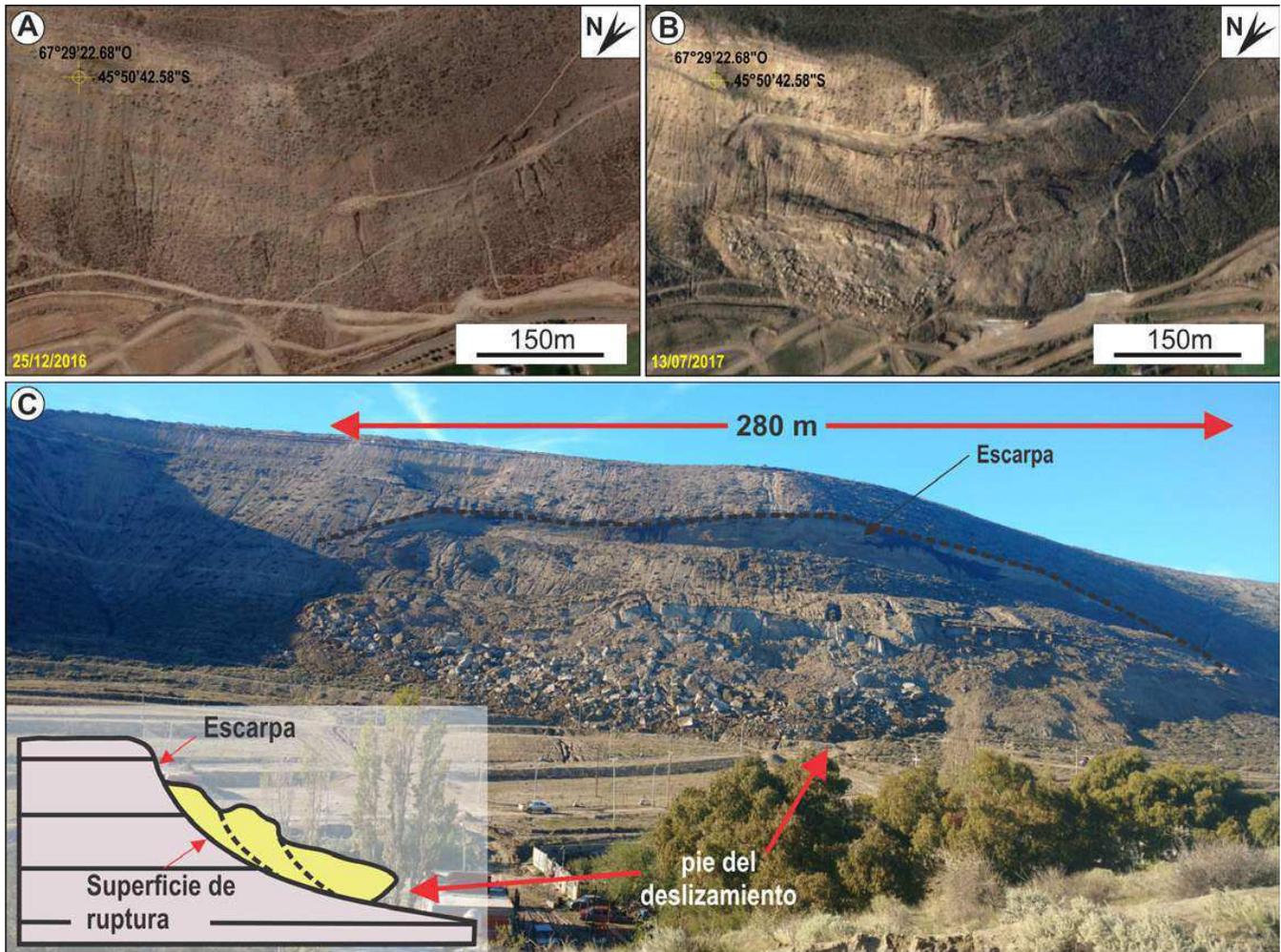


Figura 10. (A) Imagen ladera Co. Vitteau, previo al deslizamiento (25/12/2016). (B) Imagen del deslizamiento (13/07/2017). (C) Detalle del deslizamiento ocurrido el día 11 de abril de 2017. Imagen de Google Earth™.



Figura 11. Delta formado en la desembocadura del Arroyo Belgrano pocos días después de la tormenta de marzo-abril de 2017.

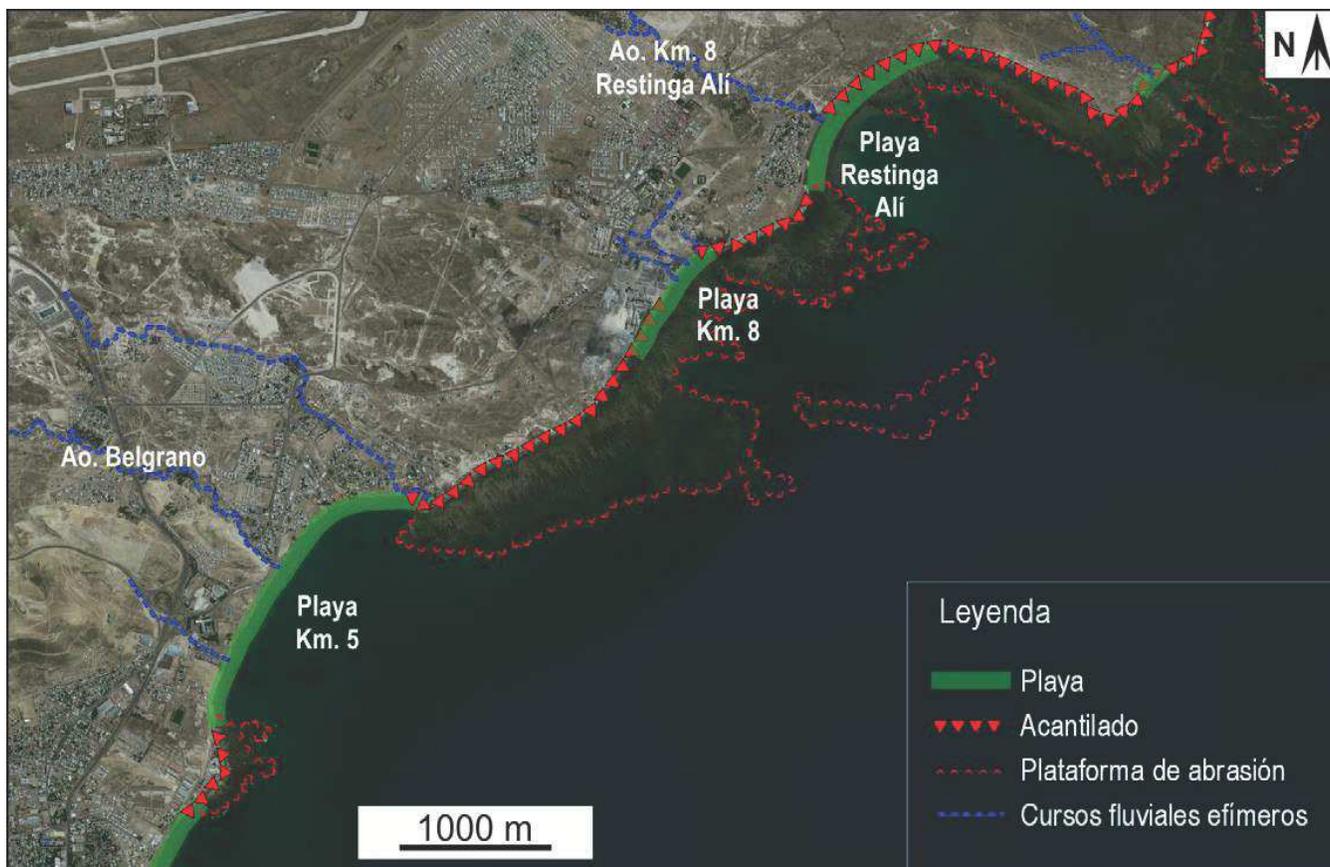


Figura 12. Ubicación de las playas de Km. 5 y Km. 8 y su relación con la posición de las desembocaduras de los sistemas fluviales.

CUENCAS DE DRENAJE

Generalidades

El término cuenca de drenaje es un concepto importante que nos permite relacionar la complejidad de la naturaleza del paisaje y los procesos hídricos que afectaron la ciudad durante el temporal. La forma más sencilla para explicar este concepto es mediante análogos con elementos cotidianos de nuestra vida diaria. Una cuenca describe un recipiente o cuenco que contiene y/o recibe todo fluido que ingresa a él. Los bordes del cuenco corresponderían a las zonas más elevadas del paisaje y en el sector central más bajo se acumula el agua ingresada. En la naturaleza este tipo de cuencas generaría una laguna o un lago. Toda el agua que ingresa por medio de las precipitaciones se acumula en el sector más bajo de la cuenca. Estos tipos se denominan cuencas sin salida o endorreicas.

Las cuencas que describen mejor nuestro paisaje local se asemejan a un cuenco que reposa sobre uno de sus lados. El agua no tiende a acumularse en la cuenca, sino que tiene una salida por el sector más bajo y angosto al que denominaremos punto de salida de la cuenca, de cierre o de descarga. Las zonas más elevadas definen el límite de la cuenca. Todo fluido que ingresa a la cuenca escurre superficialmente y se concentra en los sectores más bajos, definiendo los cursos que integran la red de drenaje de la misma (Fig. 13). Mientras

más grande es la cuenca, más agua se concentrará en su punto de salida.

Cuencas en la zona costera

La urbanización de Comodoro Rivadavia se desarrolla principalmente en proximidad al mar. Las redes de drenaje de los cañadones que nacen en la Pampa del Castillo y otros de menores dimensiones, atraviesan zonas urbanas y periurbanas, y tienen su punto de descarga en el mar (Fig. 14). El análisis de las cuencas de drenaje que se desarrollará a continuación tiene como objetivo comprender cualitativa y cuantitativamente aquellos factores que condicionaron los efectos del fenómeno meteorológico y su vinculación con el sector urbanizado.

Como primera etapa, el trabajo consistió en digitalizar y parametrizar (cantidad, longitud y pendiente) todos los cursos que integran las redes de drenajes. Se calcularon los parámetros fundamentales de cada una de las cuencas (área, perímetro, longitud, ancho, desnivel, pendiente promedio, etc.) con el objeto de estimar los índices y coeficientes que permitan explicar y predecir su comportamiento en futuras tormentas. La delimitación de cada cuenca y redes de drenaje, se elaboró con software de tipo SIG (QGIS 2.18.4), mediante digitalización manual y automática a partir de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (DEM).

Dada la ubicación de la ciudad, los puntos de salida seleccionados para el análisis se encuentran en la zona de desembocadura de los arroyos en el mar. A partir de modelos digitales de elevación se delimitaron siete cuencas de drenaje (Fig. 13) y se priorizaron las zonas más afectadas al temporal del 2017. Se excluyeron las cuencas que alojan los siguientes sitios: sector céntrico, sector norte de Km. 3 y Km. 4, y la ciudad de Rada Tilly. A continuación, se detallan los barrios de la ciudad que cada cuenca aloja.

1. Cuenca del Cañadón Biggs: Sector norte de Caleta Córdova.
2. Cuenca de Caleta Córdova: Caleta Córdova.
3. Cuenca de Km. 8: Astra, Km. 11, Km. 14, Km. 12, Km. 17, Km. 8, Próspero Palazzo y Restinga Alí.
4. Cuenca del Arroyo Belgrano: Diadema, Ciudadela, Laprida, Sarmiento, Güemes, Castelli, Rodríguez Peña y Km. 5.
5. Cuenca de Km. 3: Saavedra y Mosconi.
6. Cuenca del Arroyo de La Quinta: zona sur de la ciudad, entre ellos los barrios más afectados Juan XXIII, Tres Pinos, Moure, 30 de Octubre, Abel Amaya, Roca, Stella Maris.
7. Cuenca del Arroyo La Mata: Arenales y sector industrial.

Parámetros morfométricos de las cuencas

Las cuencas de la zona difieren en sus dimensiones, forma,

pendientes, longitud y cantidad de cursos, entre otros datos. Estos parámetros fueron cuantificados en cada cuenca para comprender los procesos ocurridos durante el temporal y poder predecir futuros comportamientos.

Los gráficos adjuntos representan los valores obtenidos de los análisis de los siguientes parámetros: área, pendiente, longitud del curso principal, forma y tiempo de concentración.

El primer parámetro calculado fue el área, medido en kilómetros cuadrados. Son tres las cuencas que presentan los mayores valores (Fig. 15A) y tienen sus nacientes en la Pampa del Castillo:

- ▶ la cuenca del Arroyo La Mata, que concentra el drenaje que recorre los cañadones El Trébol, Buena Esperanza, El Tordillo y Las Vertientes,
- ▶ la cuenca del Arroyo Belgrano que desemboca en el barrio Presidente Ortiz (Km. 5) e incluye los cañadones Casa de Piedra, Seco y La Margarita,
- ▶ la cuenca del Arroyo de Km. 8, que desemboca en el barrio Restinga Alí e incluye los cañadones Ferrais, Behr, Brooks, Baumann y Perdido,
- ▶ las cuencas más pequeñas son la de Caleta Córdova y Km. 3.

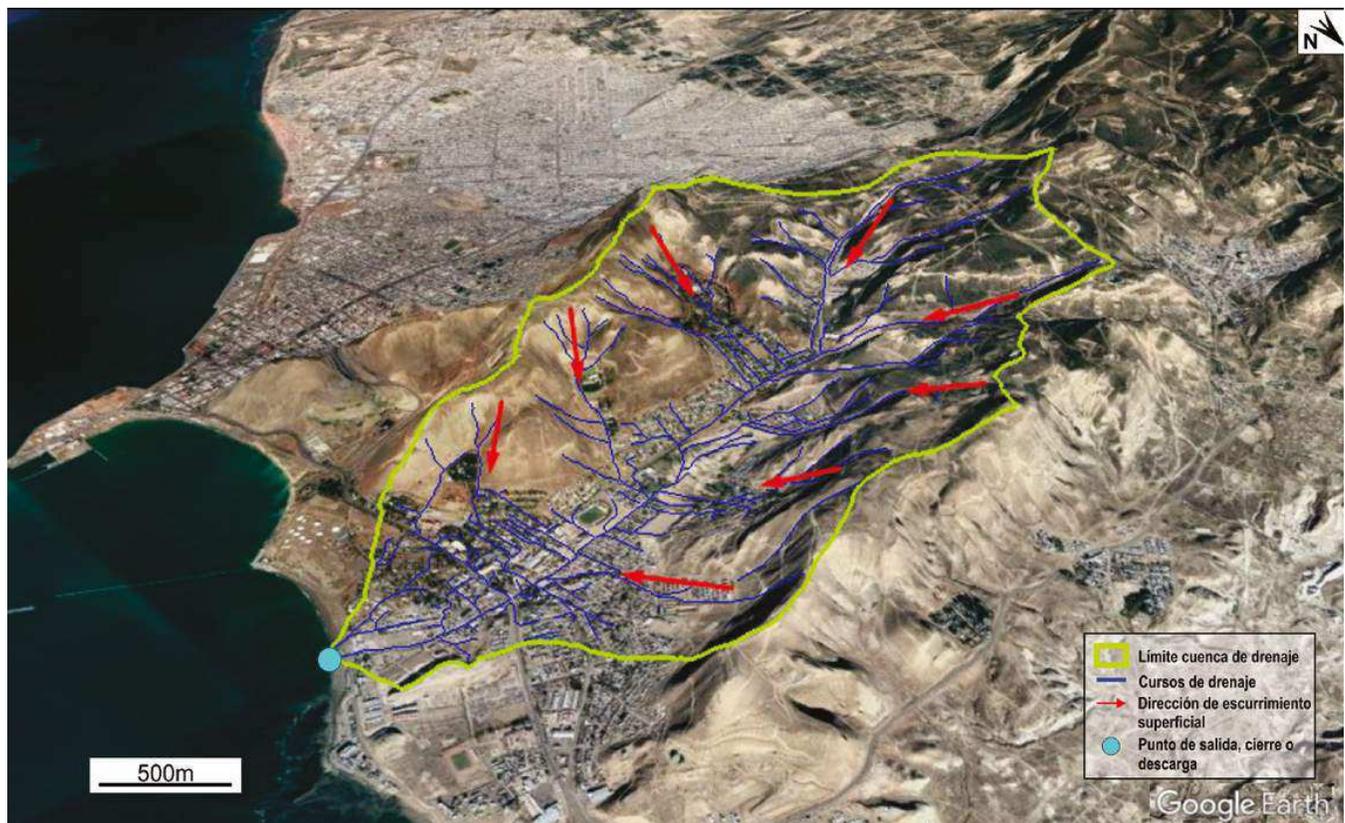


Figura 13. Vista 3D de la cuenca de drenaje de Km. 3 y su red asociada. Visualización en Google Earth.

Estos valores de área se pueden relacionar a la cantidad de agua que puede concentrar cada cuenca y descargar en su punto de salida. La relación es directa, a mayor área de la cuenca, mayor cantidad de agua alojará y se concentrará en su punto de descarga. El parámetro que cuantifica directamente este concepto es el caudal, y representa la cantidad de agua que pasa por una sección en una unidad de tiempo. Si bien se realizaron varias estimaciones de caudales para los arroyos Belgrano, La Mata y Km. 8, los datos más seguros corresponden a los calculados para el Arroyo Belgrano, que descarga en Km. 5. Se calculó un caudal de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, con el agua desplazándose a una velocidad de 3 m/s (ver Paredes et al. 2017).

El gráfico de longitudes de los cursos (Fig. 15B) muestra que las cuencas con cursos más largos son Arroyo La Mata (56 km), Belgrano (48,4 km) y Km. 8 (40,3 km). Los más cortos son Caleta Córdova y Km. 3 con 5,6 km y 6,3 km respectivamente. Las pendientes, en la mayoría de los casos son elevadas (Fig. 15C). En particular la de Km. 3 y de La Quinta, 3,71% y 2,79% respectivamente. Las cuencas Cañadón Biggs, Km. 8, Belgrano y La Mata se encuentran en un rango entre 1,30%

y 1,66%. La cuenca de menor pendiente es Caleta Córdova, con 0,27%.

La importancia de la forma de la cuenca radica en que mientras más cercano a un círculo sea, tanto más efectiva será la descarga del agua y más rápido se concentrará en su punto de salida (ver Paredes et al. 2017). Existen varios coeficientes que representan esta relación. En el siguiente gráfico se representa uno de ellos, el índice de circularidad (Fig. 15D), donde se observa que su valor más elevado (I_c : 0,59) corresponde a la cuenca de Km. 3. Es decir que esta cuenca tiene la forma más parecida a un círculo y donde más rápido se concentraría el agua. La que continúa en valor es la del Arroyo de Km. 8 (I_c 0,34). La cuenca más alargada de todas es la del cañadón Biggs ubicada al norte de la ciudad con un valor de I_c de 0,13. Este coeficiente se relaciona en forma inversa con el tiempo de concentración (T_c): a mayor I_c , menor T_c ya que representa que mientras la cuenca se parezca más a un círculo, tendrá menor capacidad para atenuar las crecidas. Uno de los primeros contratiempos que causaron las precipitaciones del 29 de marzo de 2017 se produjo en Km. 3

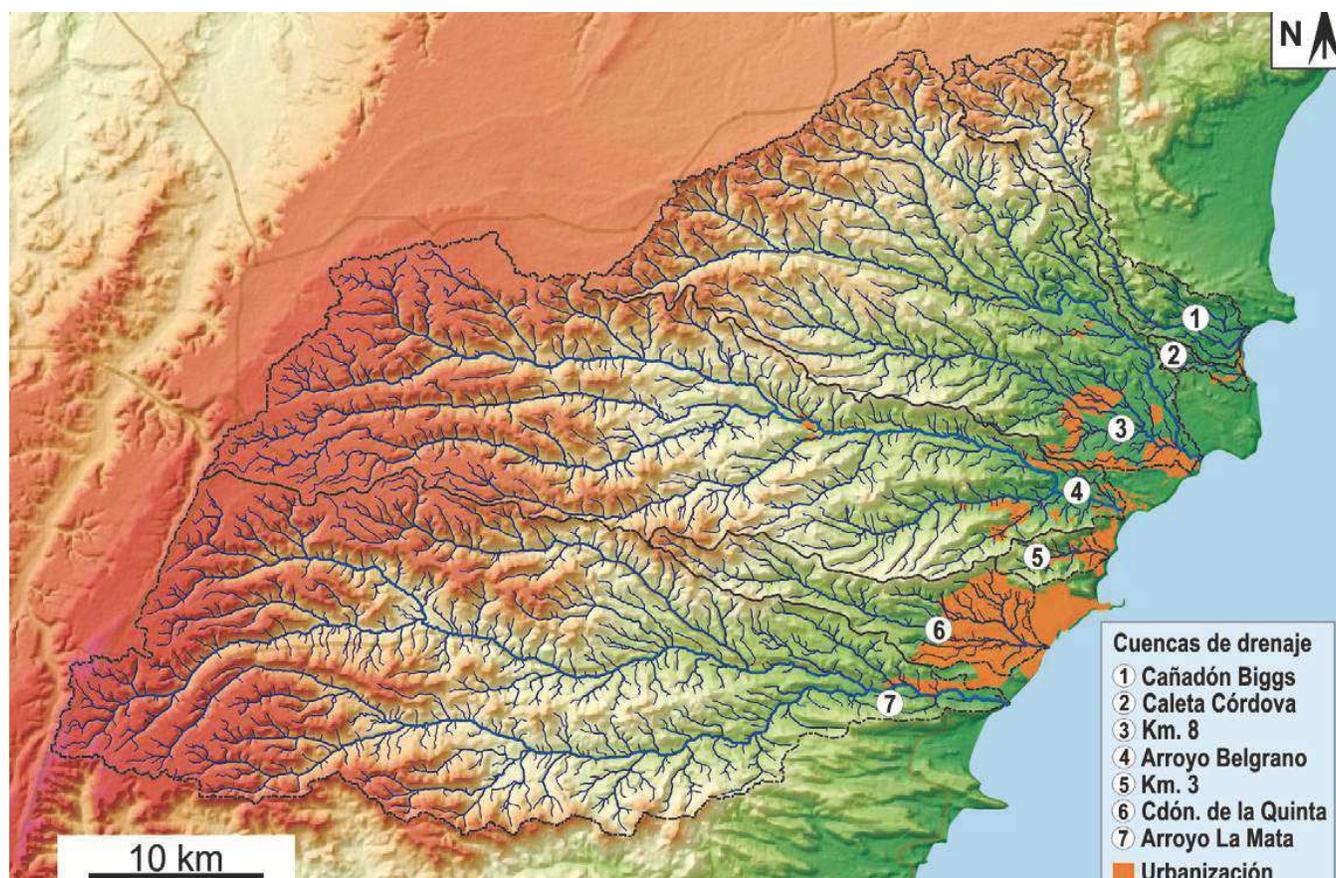


Figura 14. Ubicación de las cuencas y redes de drenaje en estudio, y su relación con el sector urbanizado de Comodoro Rivadavia. Modelo digital de elevación (SRTM p229r092).

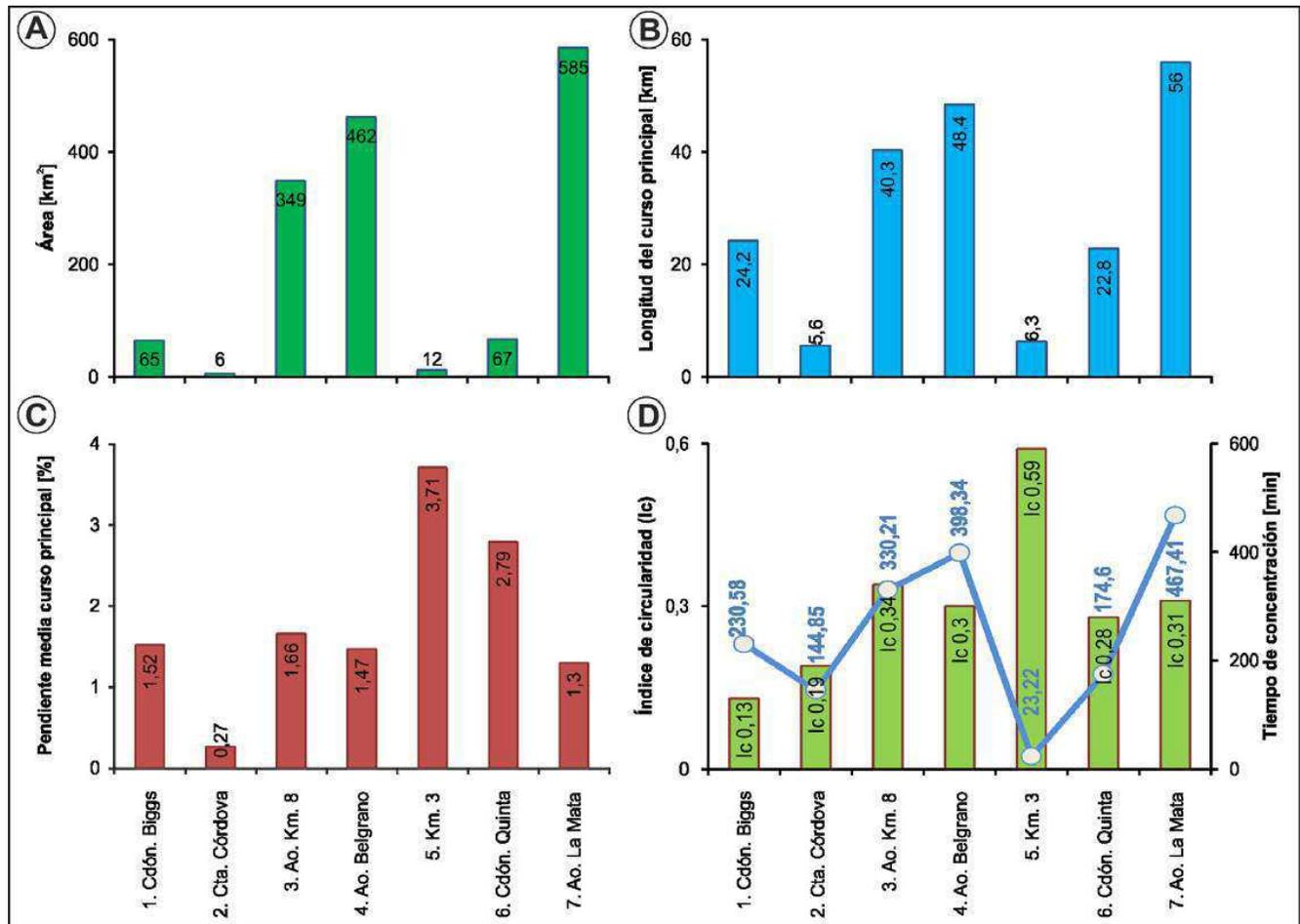


Figura 15. Diagramas de parámetros morfométricos de las siete cuencas de drenaje de Comodoro Rivadavia. (A) Área. (B) Longitud media del curso principal. (C) Pendiente media del curso principal. (D) Índice de circularidad de las cuencas (Ic) y Tiempo de concentración del agua (Tc).

Los cálculos del tiempo de concentración del agua de cada cuenca que se expresan en el gráfico (Fig. 15D), muestran que para la cuenca de Km. 3 el valor de Tc es el menor de todos, con 23,22 minutos y el mayor correspondería a la cuenca del Arroyo La Mata con 467,41 minutos (7 horas y 47 minutos).

Subcuenca Laprida: El barrio Laprida se sitúa en el sector bajo de un cañadón que drena al Arroyo Belgrano. Las pendientes observadas en esta subcuenca, son las más elevadas de la zona urbanizada (Fig. 5 y 16A), alcanzando valores máximos de 34° (68,28%). Este es un rasgo morfológico de importancia, debido a que la zona urbanizada se encuentra en la porción más baja del cañadón y el comportamiento de los procesos hídricos está relacionado en forma directa con este parámetro. A mayor pendiente del terreno, más velocidad tendrá el flujo que lo atraviese y por lo tanto mayor poder erosivo. El barrio se emplaza en la Formación Chenque, constituida por rocas sedimentarias tipo areniscas, arcilitas y coquinas. Estas rocas resistentes a la erosión generan terrazas estructurales en la parte alta y elevadas pendientes. Uno

de los sectores más críticos del barrio se ubicó en las calles Honduras y La Habana, donde se generaron cárcavas de 4 metros de profundidad y 6 metros de ancho. Como ya se mencionó antes, el flujo se encauzó en la calle erosionando sedimentos de escasa consolidación.

El material movilizado se concentró en los sectores más bajos, sobre la calle Cuba y Bahía, donde disminuyen la pendiente del terreno y la capacidad de carga del flujo (Fig. 16B, Fig. 17). Por este sitio atraviesa el curso principal del cañadón, y confluyen otros cursos que también depositaron su carga en la zona más baja. La cancha de fútbol del sector oeste funcionó como una trampa de sedimentos, del colector principal del cañadón, que impidió que llegara todo ese volumen de carga de arena al barrio.

Efecto antrópico en cuencas de drenaje

El efecto de la intervención antrópica sobre los cursos de drenaje principales fue uno de los factores que contribuyeron al daño producido en la ciudad. A continuación, se detallan algunos ejemplos.

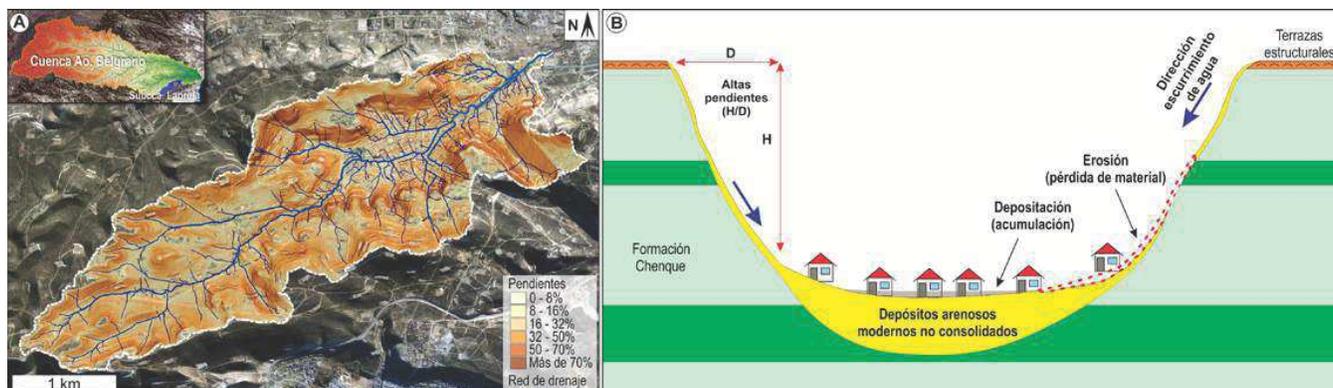


Figura 16. A) Mapa de pendientes de la subcuenca Laprida con la red de drenaje asociada. B) Esquema simplificado de la geología del barrio Laprida. Las altas pendientes originaron corrientes de gran energía que erosionaron los sedimentos arenosos sobre los cuales está edificado parte del barrio.

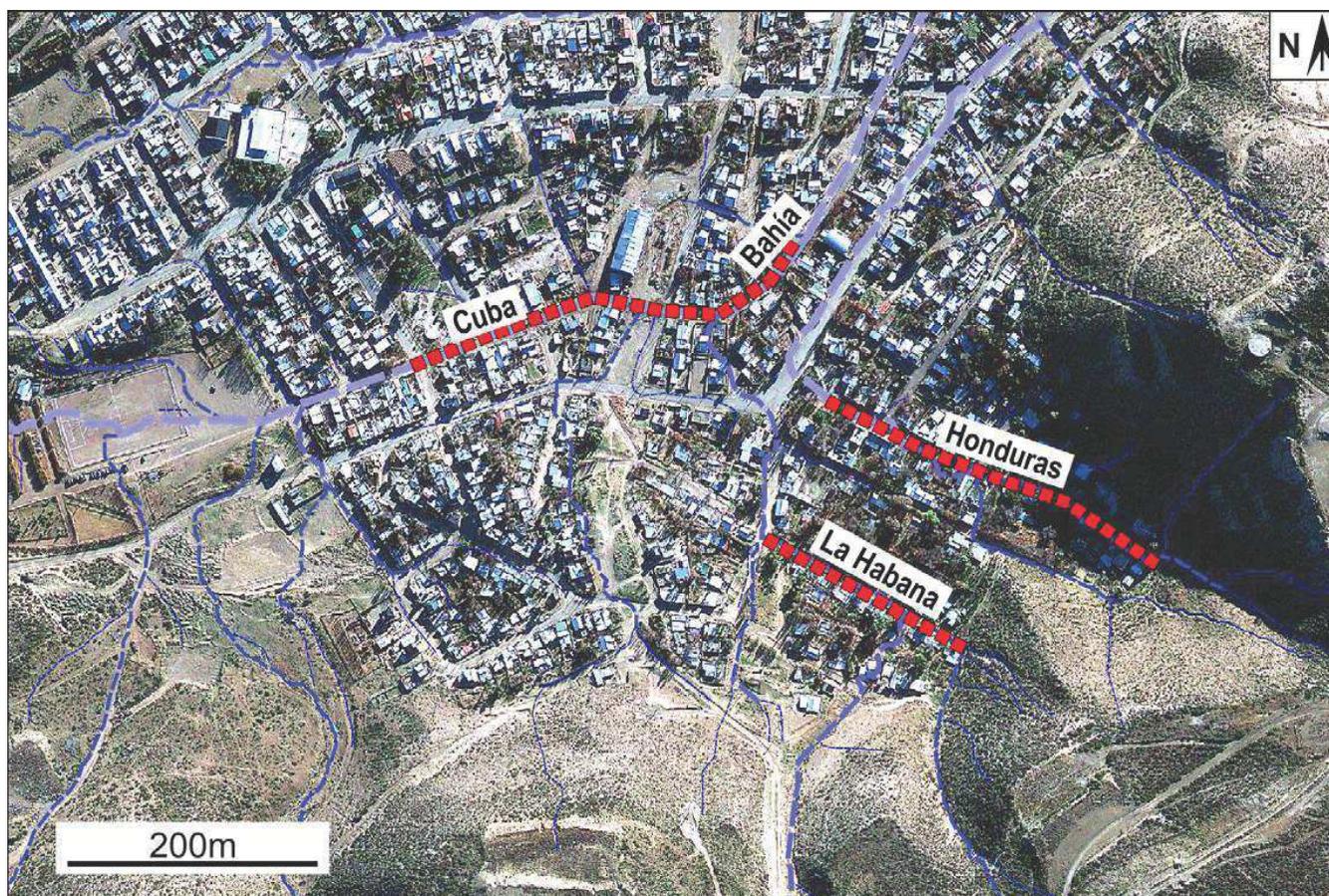


Figura 17. Zonas críticas del barrio Laprida (rojo) y red de drenaje de detalle. Imagen de Google Earth™.

Cuenca Cañadón de la Quinta: Hirtz y Blachakis (2001) realizaron una caracterización de la cuenca del Cañadón de la Quinta desde la perspectiva hidrogeomorfológica. En el presente trabajo, se realizó además un análisis multitemporal de información que reveló que la cuenca presentó hasta el año 1970 un nivel de base local. El drenaje que actualmente se encauza de manera artificial por el canal de la Avda. Roca y descarga en el mar, drenaba naturalmente hacia la zona don-

de se ubica el barrio Juan XXIII y Pueyrredón. El mapa topográfico de YPF realizado por Von Platen en el año 1929 (Fig. 18), muestra lo mencionado y además un sector deprimido y salinizado. La fotografía aérea del año 1970 (Fig. 19) muestra el sector deprimido (aunque no bien delimitado) y la acumulación de agua se observa puntualmente en una excavación, posiblemente una cantera. La Figura 20 muestra la ciudad luego del temporal en 2017 y las zonas más afectadas.

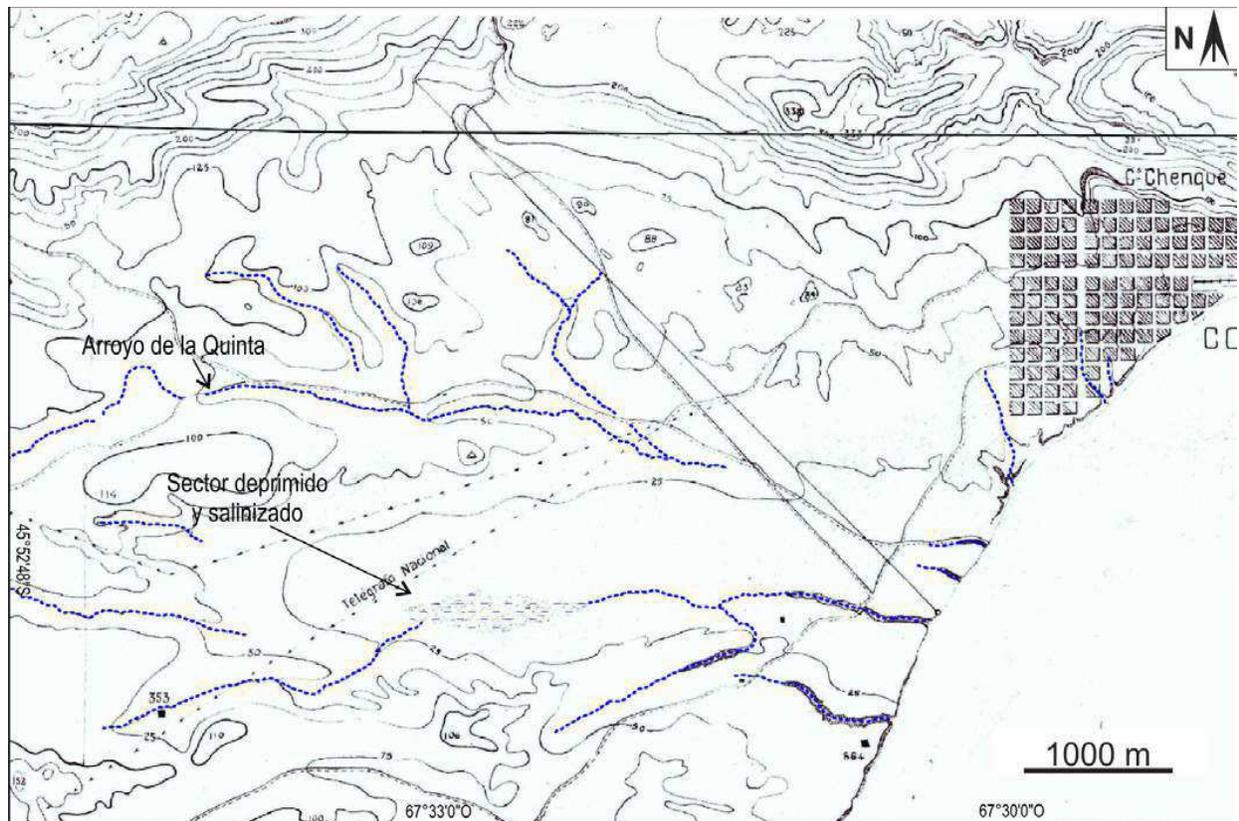


Figura 18. Mapa topográfico de diciembre de 1929, realizado por L. Von Platen para YPF. Se observa el drenaje natural al sur de la ciudad.

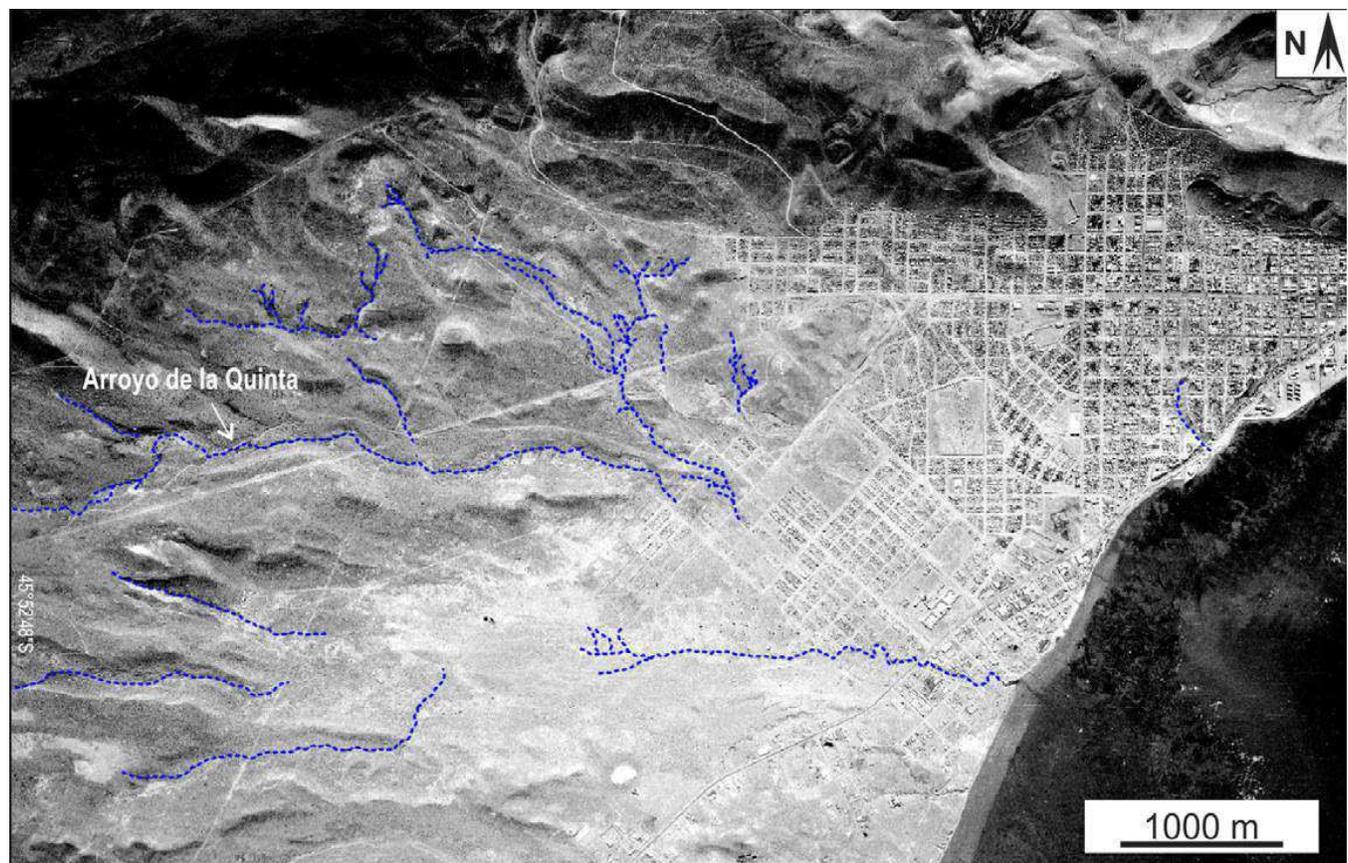


Figura 19. Digitalización de la red de drenaje sobre fotografía aérea del año 1970, cedida por el Instituto Geográfico Nacional (Oficina Provincial Chubut).

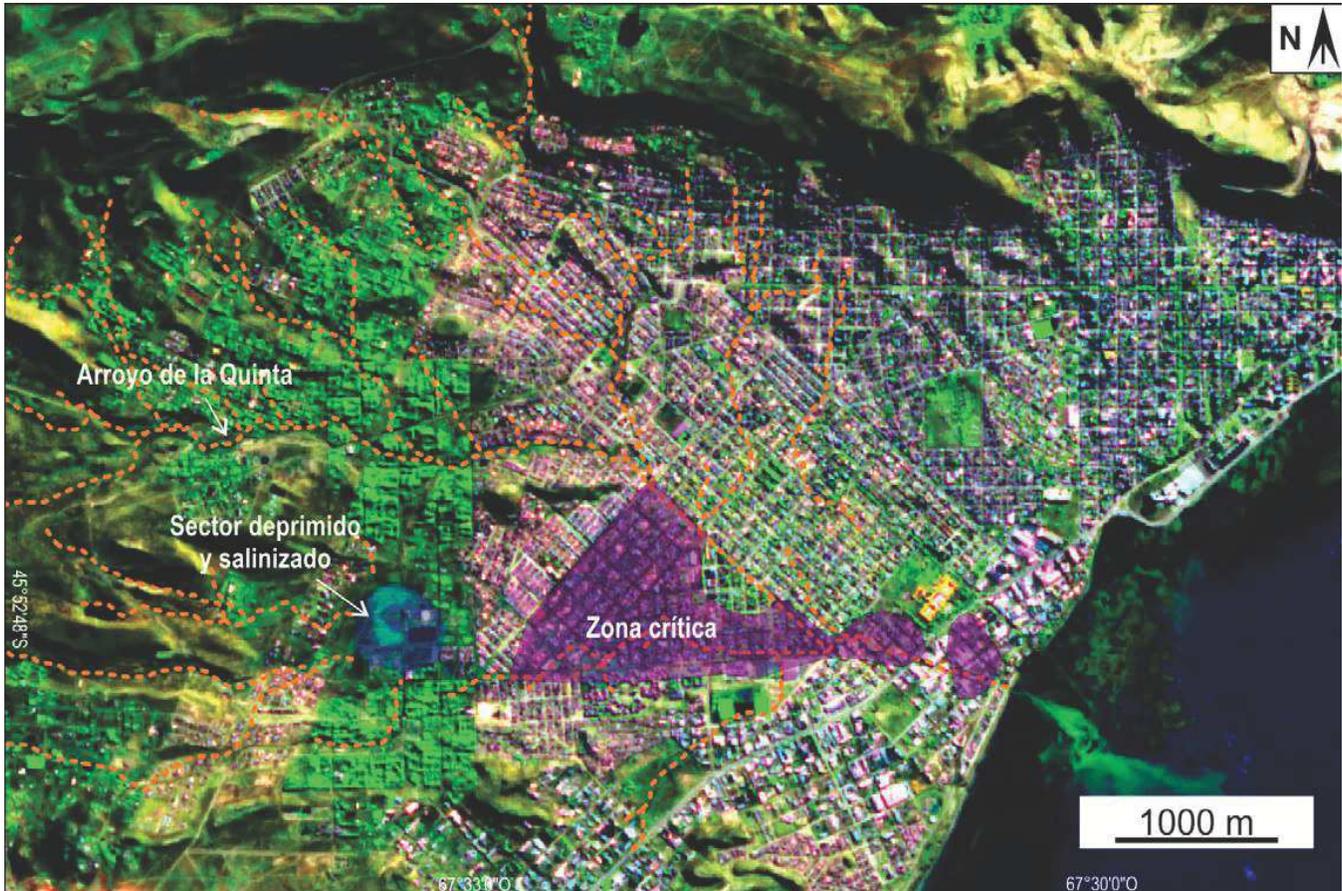


Figura 20. Composición color RGB12,8,2 de imagen satelital Sentinel 2. Muestra el drenaje actual de detalle y las zonas más críticas al 10/04/2017.

Hirtz y Blachakis (2001) calculan diversos parámetros morfométricos de la cuenca. El índice de circularidad arroja un valor de $I_c=0,246$, cercano a nuestros cálculos que dieron $I_c=0,28$. Se interpreta por el análisis morfométrico, que la cuenca al tener una forma alargada es menos efectiva a desalojar el agua. La primera lluvia del 29 de marzo 2017, saturó los sedimentos con agua, generando pérdida de cohesión entre sus partículas. La segunda precipitación ocurrida el 2 de abril, puso esos sedimentos saturados en transporte. Al llegar al canal evacuador, se producen dos eventos que conducen a la depositación de los sedimentos en el barrio Juan XXIII. El taponamiento con sedimentos arenosos en el canal evacuador, genera que el flujo escurra superficialmente. Esto produce pérdida de confinamiento del flujo cargado de sedimentos, con disminución rápida de la velocidad y en la capacidad de carga. Es decir, que el flujo “se frena” en forma rápida y no puede continuar el transporte de los sedimentos. Estos procesos condujeron a la depositación de los sedimentos arenosos directamente en el barrio Juan XXIII. La Figura 20, de fecha 10 de abril del 2017, muestra las zonas más críticas, adyacentes al canal evacuador, comprendiendo los barrios Juan XXIII, Pueyrredón sector sur, 30 de Octubre, Abel Amaya y Stella Maris.

Los caudales calculados para el Arroyo de la Quinta arrojaron valores de $28 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el diseño del canal

evacuador de la Avda. Roca sólo permitió desalojar el 20% del caudal calculado.

Cuenca de drenaje de Km.3: Las primeras dificultades que desencadenó la tormenta el día 29/03/2017 fue la interrupción del tránsito en Km. 3, en el desagüe de la calle Quintana (Fig. 21). La concentración del agua en este sector fue muy rápida, entre 15 y 20 minutos. Los cálculos de tiempo de concentración para esta cuenca, arrojaron valores de 23,22 minutos, con punto de descarga en el mar. Los parámetros morfométricos, detallados en la Fig. 15, demostraron la alta eficiencia de la cuenca en desalojar el agua que recibe de la precipitación. La subdivisión de la alcantarilla de Quintana y RN 3 produjo un lento desagote del agua concentrada en este punto, generando un endicamiento, como se observa en la imagen.

Cuenca de drenaje de Km. 8: Toda el agua colectada en la cuenca de drenaje de Km. 8 (349 km^2) debe pasar por la ruta provincial N°1 antes de llegar al mar. El puente diseñado antes de la tormenta fue insuficiente para evacuar el volumen de agua, de modo que el terraplén de la ruta terminó funcionando como dique de contención durante el jueves 30/03/2017 (Fig. 22A), agravando las inundaciones en los barrios aguas arriba. La fuerza del agua terminó arrasando con el puente y parte de la ruta en la madrugada del 31/03/2017 (Fig. 22B).



Figura 21. Ruta Nacional N°3 sobre Km.3. Fuente: Diario El Chubut (30/03/2017)



Figura 22. Ruta Provincial N°1 sobre el puente en Km. 8. (A) Los caudales exceden la capacidad evacuadora. (B) El puente fue finalmente destruido y los niveles de agua bajaron. Modificado de Foix et al. (2017).((

CONCLUSIONES

Los resultados indican que, en todos los casos, las cuencas de drenaje analizadas cuentan con pendientes muy elevadas, favoreciendo los procesos erosivos en las cabeceras. Sin embargo, también pudo establecerse que la intensidad del carreamiento no sólo se encuentra en relación a la existencia de pendientes altas, sino a la constitución geológica de cada sector; los daños más grandes ocurrieron cuando el agua se encauzó sobre depósitos cuaternarios friables. El análisis de la forma, tamaño y pendiente de las redes de drenaje indican que, en todos los casos, la llegada del agua a las zonas bajas urbanizadas es en un lapso de pocas horas. Sin embargo, la cuenca de Km. 3 es la que tiene los índices más alarmantes en la llegada súbita de la descarga acuosa. Este

tipo de información se considera valiosa para la elaboración de protocolos de emergencia y evacuación, a fin de minimizar las pérdidas. Por otro lado, la extraordinaria descarga acuosa de los sistemas fluviales analizados excedió en casi todos los casos a la capacidad evacuadora de los sistemas pluviales, poniendo de manifiesto la necesidad de re-evaluar los caudales de diseño de estas obras civiles.

En resumen, la combinación de precipitaciones extraordinarias, altas pendientes, obras civiles deficientes y urbanización en zonas riesgosas, fueron los factores más importantes que desencadenaron los daños en Comodoro Rivadavia durante la tormenta de 2017.

REFERENCIAS CITADAS

- ▶ **Césari, O. y Simeoni, A., 1994.** Planicies fluvio-glaciares terrazadas y bajos eólicos de la Patagonia Central, Argentina. 13^o Symposium Latin-American Geosciences, Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, 1: 155-164.
- ▶ **Chartier, M.P., Rostagno, C.M. y Roig, F.A., 2009.** Soil erosion rates in rangelands of northeastern Patagonia: A denrogeomorphological analysis using exposed shrub roots. *Geomorphology*, 106: 344-351.
- ▶ **Darwin, C., 1846.** Geological observations on South America. Being the third part of the geology of the voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, R.N. during the years 1832 to 1836. Smith Elder and Co. London., 280 p.
- ▶ **Foix, N., Allard, J.O., Paredes, J.M. y Ocampo, S.M., 2017.** Descarga acuosa extraordinaria de sistemas fluviales efímeros y daños urbanos asociados: tormenta 2017 en Comodoro Rivadavia. V Jornadas de las Ciencias de la Tierra Dr. Eduardo Musacchio, EDUPA, Comodoro Rivadavia, p.40-42.
- ▶ **Hirtz, N. y Blachakis, A., 2001.** Caracterización hidrogeomorfológica y análisis de crecidas de la cuenca del Cañadón de La Quinta, Comodoro Rivadavia, Chubut. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 16: 79-90. Buenos Aires.
- ▶ **Martínez, O., González, M., Toppazzini, M. y Kutschker, A., 2014.** Mantos de grava y evolución del paisaje en el suroeste de la provincia del Chubut (Argentina), desde el Mioceno hasta el presente. *Rev. de la Soc. Geológica de España*. 27:39-50.
- ▶ **Mazzoni, E. y Vazquez, M., 2009.** Desertification in Patagonia. *Developments in Earth Surface Processes*, 13: 351-377.
- ▶ **Ocampo, S.M. y Foix, N., 2012.** Inversión de relieve en paleocanales cretácicos y su control en la geomorfología, Provincia del Chubut, Patagonia extraandina. V Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Río Cuarto. Resúmenes, p. 84.
- ▶ **Paredes, J.M., Ocampo, S.M., Foix, N., Olazábal, S.X., Fernández, M.A., Montes, A., Castro, I., Maza, W., Allard, J.O., Rodríguez, S., San Martín, C., Simeoni, A., Mendos, G., Quagliano, J.A., Turra, J.M., Maino, J., Sánchez, F. y Valle, M.N., 2017.** Sistemas fluviales efímeros e inundaciones repentinas de la ciudad de Comodoro Rivadavia: causas, procesos y mitigaciones. Informe Técnico FCNyCS. UNPS-JB, p. 1-44. Comodoro Rivadavia.
- ▶ **Sciutto, J.C., Césari, O. e Iantanos, N., 2008.** Hoja geológica 4569-IV Escalante, escala 1:250000: Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 351, 76 p. Buenos Aires.
- ▶ **Simeoni, A., 2008.** Mesetas y bajos de la Patagonia central extraandina. La Inversión del Relieve. En: Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Tomo II - Sur: 729-745.
- ▶ **Tarbut, E.J., Lutgens, F.K. y Tasa, D., 2005.** Ciencias de la Tierra 8^o Edición. Ed. Pearson Educación SA, Madrid. p. 736.
- ▶ **Vidal, P.A., 2018.** Reconocimiento geológico y caracterización del comportamiento geomecánico de unidades de suelos y rocas sedimentarias en un sector urbano y periurbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia (barrios Divina Providencia y Sismográfica). Trabajo Final de carrera de grado (Dpto. Geología, FCNyCS-UNPSJB), inédito. p. 170.