



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA SAN JUAN BOSCO
Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud
Departamento de Geología
Ruta Provincial N°1, S/N, Km. 4, Ciudad Universitaria
Comodoro Rivadavia, Chubut – Argentina



“Análisis de peligrosidad geológica asociada al riesgo hidrometeorológico sobre la cuenca del Cañadón de Km. 3 (B° Gral. Mosconi y otros), a raíz del temporal de marzo/ abril de 2017 en la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina”



Alumno: Cortés Maximiliano

Director: Geólogo González Daniel

Año: 2022



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. RESUMEN..... | 4 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 2.1. Riesgos y procesos geológicos..... | 6 |
| 2.2. Cuenca de drenaje de Km. 3..... | 9 |
| 3. OBJETIVOS..... | 10 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 11 |
| 4.1. Desarrollo de la metodología planteada..... | 11 |
| 4.1.1. Trabajo de campo..... | 11 |
| 4.1.2. Trabajo de gabinete..... | 11 |
| A. Cálculo de parámetros morfométricos..... | 12 |
| B. Estimación de caudal..... | 13 |
| C. Estimación de caudal del sistema de drenaje urbano..... | 17 |
| D. Procesos geodinámicos y urbanización..... | 18 |
| E. Mapas temáticos..... | 18 |
| F. Encuestas a vecinos de la zona afectada..... | 22 |
| 5. ÁREA DE ESTUDIO..... | 23 |
| 6. ANTECEDENTES..... | 24 |
| 6.1. Geología Regional..... | 24 |
| 6.2. Geología local..... | 25 |
| 6.3. Geología estructural..... | 28 |
| 6.4. Geomorfología..... | 29 |
| 6.5. Clima..... | 31 |
| 6.6. Evolución de la tormenta y sus consecuencias sobre el ejido urbano ... | 32 |
| 7. RESULTADOS..... | 34 |
| 7.1. Encuesta..... | 34 |
| 7.2. Sistema Fluvial..... | 36 |
| 7.3. Análisis morfométrico..... | 39 |
| 7.4. Evolución de la cuenca con relación a la urbanización..... | 42 |
| 7.5. Estimaciones de Caudal..... | 44 |
| 7.5.1. $Q=A*V$ | 44 |
| 7.5.2. SCS CN..... | 46 |
| 7.5.3. HEC HMS..... | 49 |
| 7.6. Procesos geodinámicos que afectan a la urbanización..... | 52 |



| | |
|---|-----|
| 7.6.1. Erosión hídrica: Cárcavas | 52 |
| 7.6.2. Inundaciones | 63 |
| 7.6.3. Asentamientos del terreno | 66 |
| 7.6.4. Remoción en masa | 67 |
| 7.6.6. Afloramiento de agua subterránea..... | 71 |
| 7.6.7. Erosión costera | 72 |
| 7.7. Mapas temáticos..... | 73 |
| a) Mapa Geomorfológico (Fig. 38) | 74 |
| b) Mapa Geológico (Fig. 39)..... | 78 |
| c) Mapa de zona de influencia fluvial (Fig. 40)..... | 80 |
| d) Mapa de Pendientes (Fig. 41)..... | 82 |
| e) Mapa de cobertura vegetal (Fig. 43)..... | 84 |
| f) Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales (Fig. 44)..... | 88 |
| 7.8. Peligrosidad geológica | 91 |
| 7.8.1. Mapa de peligrosidad geológica (Fig. 46) | 92 |
| 7.8.2. Procesos geodinámicos externos y su posible recurrencia en el tiempo | 95 |
| 8. DISCUSIÓN..... | 95 |
| 8.1. Encuestas | 95 |
| 8.2. Caracterización del sistema fluvial | 96 |
| 8.2. Efecto de la urbanización | 99 |
| 8.3. Estimaciones de caudal | 100 |
| 8.4. Procesos geodinámicos externos | 102 |
| 8.5. Mapas temáticos y peligrosidad geológica..... | 112 |
| 9. CONCLUSIONES | 114 |
| AGRADECIMIENTOS | 118 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA..... | 119 |
| 11. ANEXOS | 132 |



1. RESUMEN

Se realizó un análisis de peligrosidad geológica de la cuenca de drenaje de Km. 3 (Cuenca Mosconi) motivado por los procesos desencadenados por las precipitaciones de marzo – abril de 2017 y su origen.

Los procesos naturales que ocurren en áreas urbanizadas afectan la vida de las personas, bienes económicos, servicios básicos y actividades económicas. Estos elementos definen el riesgo, el cual se calcula en base a la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición. Existen varios tipos de riesgo, entre ellos se destaca el geológico, en los que predominan los eventos de erosión hídrica y remoción en masa, los hidrometeorológicos, en forma de inundaciones, y los socio-naturales, donde la influencia humana exagera o provoca los anteriores. Todos ellos son los que confluyen en la cuenca de drenaje de Km. 3 por lo que es necesario entender sus causas a fin de determinar medidas que disminuyan la peligrosidad de los eventos naturales.

El objetivo general del presente trabajo consiste en realizar el análisis de peligrosidad de la cuenca de Km. 3 a partir del cumplimiento de objetivos específicos vinculados a evaluar los parámetros morfométricos, estimar el caudal máximo generado por las precipitaciones de 2017, identificar las causas e impacto de los procesos geológicos mediante la elaboración y análisis de mapas de peligrosidad, aumentar el conocimiento del comportamiento de la cuenca para establecer medidas de mitigación acordes y establecer una metodología de trabajo básica.

La caracterización de la cuenca de drenaje se realizó mediante el cálculo de sus parámetros a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta posee un área de 13.36 km² la cual abarca rocas de la Fm. Chenque y depósitos coluviales y aluviales modernos que tapizan laderas de los cerros Vitteau y Hermitte, y alcanzan hasta 63° de inclinación. El eje de la cuenca se orienta de oeste a este y hace su descarga al mar hacia el este. El cauce principal es de 5° orden y tiene una extensión de 6.43 km. Los parámetros morfométricos que caracterizan el comportamiento de la cuenca de drenaje presentan una relación de elongación de 0.69, un índice de circularidad de 0.52, un índice de Gravelius de 1.38, una densidad de drenaje de 5.6 km/km², una frecuencia fluvial de 38.19 cauces/km², un flujo no encauzado de 0.089, una relación de bifurcación de 4.48, una infiltración relativa de 213.86 cauces/km³, una relación



de relieve de 60.2 y un número de rugosidad de 2.02. Esto implica que la cuenca de drenaje presenta una tendencia a la circularidad con pendientes elevadas y superficies de baja permeabilidad capaces de desarrollar escorrentías superficiales erosivas con bajos tiempos de concentración, que posibilitan la ocurrencia de inundaciones de tipo *flash flood*. Estos parámetros son el resultado del aumento de la urbanización, que actualmente ocupa el 48% de la cuenca, donde la impermeabilización de los suelos también aporta un mayor volumen de escorrentía y tiempos de concentración cortos.

Los procesos naturales que ocurren en la cuenca de drenaje son la erosión hídrica, las inundaciones y la remoción en masa sobre las laderas empinadas. Las cárcavas se encuentran en los faldeos de los cerros asociadas a caminos y locaciones petroleras, y loteos de viviendas. Sin embargo, las más preocupantes se desarrollaron durante el temporal en la zona baja y urbanizada de la cuenca en las cuales la concentración de flujo junto con velocidad elevada erosionó los suelos desprotegidos. Los procesos de inundación tuvieron lugar en la alcantarilla, ubicada en la calle Petrolero San Lorenzo y la Ruta Nacional N° 3, a causa de que justamente se obstruyó con un vehículo, basura y sedimento. A esta situación se le sumó que la Ruta Nacional N° 3 se interpone de forma transversal al flujo y sobreelevada 2.2 m. Los sistemas pluviales también tuvieron un rol fundamental en el desarrollo de la inundación ya que, el ubicado debajo de la calle Petrolero San Lorenzo tiene la capacidad de drenar 6.18 m³/s frente a el caudal estimado (mediante ecuación de continuidad, SCS CN y HEC - HMS 4.5) que varía entre 22.54 y 41.9 m³/s. Los fenómenos de remoción en masa se dan sobre las laderas empinadas de la cuenca, en las que son muy comunes los deslizamientos, la caída de rocas y los flujos de barro y detritos, muchos de ellos fueron desencadenados por las lluvias de la tormenta de 2017, siendo el ingreso de agua a la masa rocosa el factor fundamental para propiciar los movimientos de ladera. Estos fenómenos naturales de alta peligrosidad quedan evidenciados en los mapas de peligrosidad. Las zonas más seguras corresponden al fondo de valle, talud inferior y terrazas estructurales, siempre y cuando no se encuentren afectadas por el escurrimiento encauzado del sistema fluvial.

En función de estas problemáticas se sugiere aplicar medidas de mitigación con el objetivo de reducir la peligrosidad geológica. En el caso de las cárcavas deben establecerse protocolos para la construcción de las locaciones



y sus caminos de acceso, implementar un sistema de diques en las cárcavas más importantes, establecer piletas o diques de retención y desviar el flujo en las cabeceras de las cárcavas. En relación con las zonas inundables, es necesario readecuar el pluvial subterráneo de la calle Petrolero San Lorenzo y en función de esto contemplar las dimensiones y diseño de sus alcantarillas o descentralizar el flujo del centro de la cuenca con dos pluviales menores paralelos a los cerros Vitteau y Hermitte o evitar las entubaciones con un pluvial a cielo abierto, como así también implementar sistemas de aviso temprano, planes de evacuación, mejorar avisos previos a tormentas y comunicar medidas de prevención. Para los procesos de remoción en masa es imprescindible no realizar movimientos de suelo al pie de los taludes, captar el agua superficial sobre deslizamientos, evitar el riego, controlar el estado de las cañerías, monitorear los movimientos con puntos fijos de medida, realizar estudios de estabilidad e idear planes de contingencia y de alerta temprana. Para reducir la erosión costera de acantilados se aconseja construir muros de contención o escolleras de rocas de gran volumen y establecer áreas restringidas sobre las playas y acantilados.

La metodología implementada a través del uso de Sistemas de Información Geográfico, la elaboración de mapas y su evaluación, son herramientas sumamente útiles para el reconocimiento de áreas donde los procesos naturales afectan o pueden afectar a la población. Su análisis permite reconocer las causas de sus consecuencias y a partir de ello implementar medidas de mitigación acordes.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Riesgos y procesos geológicos

Los procesos naturales que ocurren en áreas urbanas afectan fundamentalmente la vida de las personas, bienes económicos, servicios básicos, actividades económicas, entre otras. Estos son los elementos necesarios (ocurrencia de un fenómeno natural y sus consecuencias) que definen el riesgo (González de Vallejo, 2002). Según la UNESCO (Varnes, 1984, como se citó en González de Vallejo, 2002) el cálculo del riesgo se conforma por la evaluación de la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición. González de Vallejo (2002) conceptualiza a la peligrosidad como la probabilidad de ocurrencia



de un proceso de una magnitud determinada en un período de tiempo dado y en un área específica. Wilches Chaux (1993) considera la vulnerabilidad como “la incapacidad de un sistema de absorber mediante el autoajuste los efectos de un determinado cambio en su ambiente”. La exposición refiere a la presencia o no, de personas y/o bienes dentro del ámbito donde ocurre un fenómeno natural (Crichton, 2008). La reducción del riesgo a través de su gestión consiste en la implementación de recursos disponibles, diseño de estrategias e instrumentos de mitigación que puestos en práctica proporcionan a la sociedad la capacidad de poder absorber los cambios y mantener la misma función, estructura, identidad y retroalimentación, es decir, aumentar la resiliencia (Walker et al., 2004; Massera, 2018).

Existen diferentes tipos de riesgo entre lo que se destacan los geológicos y los hidrometeorológicos, que a su vez se relacionan entre sí, ya que la ocurrencia de uno desencadena el otro.

Los riesgos geológicos implican la actuación de procesos geodinámicos internos, como es el caso de sismos y erupciones volcánicas, y externos, como los movimientos de ladera, erosión y hundimientos, entre otros. La erosión hídrica se expresa mediante las cárcavas. Casalí et al. (1999) las definen como “cursos de agua originados por la concentración de flujos superficiales sobre suelos erosionables durante eventos de precipitación”. Argüelo y Sanabria (2004) agregan que la susceptibilidad a la erosión no solo depende de las características del suelo sino también al poder erosivo de la escorrentía y que su peligrosidad radica en la pérdida de tierras, el cambio en la dinámica del agua en una cuenca, el empobrecimiento de la infiltración, el corte de caminos y la amenaza a infraestructuras. El transporte de sedimentos previamente erosionados produce acumulaciones en las zonas bajas y genera soterramientos en zonas urbanas y pérdida de eficiencia de obras hidráulicas (Zambrano, 2015). Los procesos de remoción en masa, o también llamados de movimientos de laderas, constituyen una peligrosidad muy alta debido a que se movilizan grandes volúmenes de roca capaces de afectar edificaciones, cauces y a la población. Entre ellos se hallan los deslizamientos, flujos de barro, caída de bloques y reptación (González de Vallejo, 2002). Los deslizamientos se caracterizan por el movimiento de masas de suelo o roca a través de un plano de rotura (González de Vallejo, 2002). Los flujos de barro se componen de



materiales finos saturados en agua que recorren distancias a gran velocidad (González de Vallejo, 2002). A diferencia de este último, la caída de bloques presenta materiales de todo tipo de granulometrías característicos de laderas con pendientes elevadas y baja cobertura vegetal sin la participación del agua (González de Vallejo, 2002). La reptación se da de manera casi imperceptible a través de pequeños pulsos de desplazamiento pendiente abajo (González de Vallejo, 2002). Estos procesos también se encuentran en zonas costeras sobre acantilados activos, donde la erosión del oleaje junto con acción hidráulica del agua socava la parte baja del acantilado y desestabiliza las rocas superiores (Gutiérrez Elorza, 2008).

En relación a los riesgos hidrometeorológicos, a nivel mundial se destaca el aumento drástico en el número de inundaciones entre el período 1997 – 2006 (Adikari y Yoshitani, 2009). La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil de España (MJI, 1995) define las inundaciones como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos por la aportación inusual de una cantidad de agua. El término anegamiento hace referencia a relieves cóncavos donde el agua se ve imposibilitada de migrar, por lo que caracterizan un proceso más gradual y persistente en el tiempo (González Uriarte y Navarro, 2004). Los *flash floods* o inundaciones repentinas son un tipo de inundación que se consideran como uno de los desastres naturales más importantes del mundo debido a su carácter impredecible y a las cantidades altas de carga sedimentaria (Crichton, 2008), pero su característica más importante es la rapidez casi instantánea en la que se producen, y resultan en hidrogramas con curvas de ascenso abruptas y tiempo de concentración cortos, comunes en áreas montañosas (Díez et al., 2009), y regiones áridas donde prevalecen sistemas fluviales efímeros (Paredes et al., 2017, 2020, 2021; Paredes y Ocampo, 2019).

Tanto los riesgos hidrometeorológicos como los geológicos se ven exacerbados por la influencia humana lo que permite hablar de riesgos socio – naturales, que se definen como “la intersección de las prácticas humanas con el medio natural, en condiciones de degradación ambiental, de inadaptabilidad al entorno o bajo condiciones de insuficiencia y/o deficiencias en las dotaciones de infraestructuras urbanas y rurales” (Lavell, 1996, 2003). Esta intervención humana puede analizarse desde dos escalas. A escala global, las actividades antrópicas principalmente la combustión de combustibles fósiles provoca



consecuencias sobre el clima que se evidencian en el incremento de la temperatura media del planeta, el aumento del nivel del mar, la retracción de los glaciares y el aumento de fenómenos extremos (Camilloni, 2018). Rabassa (2010) menciona que el “área Patagónica se ve afectada por la pérdida de biodiversidad y de masa forestal, mayor frecuencia de eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías), pérdida de permafrost, desecación de turberas, retroceso de glaciares, entre otras”. A escala local, el crecimiento de las ciudades se construye modificando la naturaleza, que resulta en un nuevo ambiente que combina lo social con lo natural, se crean nuevas amenazas o amplifican en intensidad y recurrencia las ya existentes (Lavell, 1996).

2.2. Cuenca de drenaje de Km. 3

En los últimos años, más precisamente en 1998, 2010, 2011, 2013, 2014 y 2017 (Tejedo et al., 1999; Hirtz et al., 2000a; Massera, 2018; Cabral Marques, 2019), los riesgos geológicos e hidrometeorológicos han tomado mayor relevancia debido a las consecuencias acontecidas, sobre todo relacionadas a los riesgos hidrometeorológicos después del temporal de 2017. Existen trabajos que analizan, desde el punto de vista de la peligrosidad geológica, los procesos naturales que ocurren en la ciudad de Comodoro Rivadavia en los que se realiza una valoración de ellos y su cartografía donde se identifica su ubicación y extensión, siendo los más relevantes respecto a la peligrosidad los procesos de remoción en masa sobre taludes (Tejedo et al., 1999; Hirtz et al., 2000a). Sin embargo, el análisis generalizado debido a una escala de trabajo regional, su publicación previa a eventos meteorológicos importantes hace que no se plantee un especial tratamiento sobre los sistemas fluviales. Algunas publicaciones (González et al., 2002; Tchilinguirian, 2003; Vidal, 2018) acotadas a algunos de los taludes dentro de la cuenca de drenaje de Km. 3 mencionan como procesos importantes el carcavamiento y el “*piping*”, no obstante, sus objetivos de análisis son los procesos de remoción en masa. Por otra parte, Vidal (2018) incorpora en su mapa de peligrosidad geológica como unidad de alta peligrosidad una sección del cauce principal de la cuenca de drenaje de Km. 3 aunque su evaluación de peligrosidad no abarca el total de la cuenca de drenaje.



Luego de la catástrofe hidrometeorológica de 2017, se han publicado trabajos que abordan la temática sobre los sistemas fluviales efímeros, a escala regional, de Comodoro Rivadavia (Paredes et al., 2017, 2020, 2021; Paredes, 2019) en los que se hace hincapié en la erosión hídrica, transporte y depositación de sedimentos, análisis morfométricos y comparación de varias cuencas de drenaje con sus respectivas estimaciones de caudal y recomendaciones frente a las problemáticas halladas. Paredes et al. (2017, 2020, 2021), Ocampo et al. (2019) y Paredes y Ocampo (2019) describen que la cuenca de Km. 3 presenta una superficie muy reducida, un tiempo de concentración de apenas 20 minutos, una tendencia a la circularidad y pendientes de laderas elevadas, que en conjunto resultan en un gran volumen de escorrentía que llega sumamente rápido al punto de descarga a modo de *flash flood*, con un caudal estimado de 5 m³/s.

La principal motivación de este trabajo son las terribles consecuencias producidas por el temporal de 2017, donde la cuenca de Km. 3 presentó variadas situaciones entre las que se destacan la inundación, el desarrollo de cárcavas y los procesos de remoción en masa, todos ellos en estrecha cercanía con la urbanización. Esto llevó a pensar cuales eran los causales por las que ocurrieron estos eventos naturales, haciendo especial énfasis sobre el sistema fluvial, y cuales podrían ser las medidas para disminuir la peligrosidad, o bien, si ya se redujo. Los sistemas fluviales no son abordados en profundidad por los análisis de peligrosidad existentes los cuales no se encuentran actualizados. Los trabajos más recientes generados después del temporal, si bien no realizan un análisis de peligrosidad, evalúan todos los fenómenos producidos por la tormenta en la ciudad de Comodoro Rivadavia, aunque a escala regional.

3. OBJETIVOS

El objetivo general consiste en la evaluación de la peligrosidad geológica de la cuenca de drenaje de Km. 3, ubicada en la ciudad de Comodoro Rivadavia. Para alcanzar este objetivo general, se deben alcanzar los objetivos específicos que incluyen:

- a) Evaluar los parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje.



- b) Estimar los caudales de tránsito producidos por las precipitaciones de 2017.
- c) Evaluar la respuesta de la cuenca de drenaje frente al avance de la urbanización.
- d) Identificar y establecer relaciones genéticas entre los procesos geológicos y sus impactos, a partir de elaborar y analizar mapas de peligrosidad geológica de la cuenca de drenaje.
- e) Aumentar el conocimiento del comportamiento de la cuenca respecto al impacto que generan los fenómenos naturales a fin de establecer medidas de mitigación que reduzcan la peligrosidad geológica.
- f) Establecer una metodología de trabajo básica que sirva de guía para aplicarse con facilidad a otras cuencas de la ciudad.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Desarrollo de la metodología planteada

4.1.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en el recorrido de la zona de estudio para corroborar que los mapas temáticos, realizados a través de distintos programas informáticos, junto con imágenes satelitales y fotografías aéreas, coincidieran con las observaciones de campo. Durante el mismo se puso énfasis, por una parte, en determinar los procesos geomorfológicos actuantes, algunos de ellos imposibles de ser determinados mediante el uso de información satelital como, por ejemplo, la caída de bloques y flujos de barro y detritos. Por otra parte, determinar la forma en que estos interactúan con la urbanización, o en casos puntuales, la afectación a las infraestructuras urbanas debida a otros tipos de causas. También se tomaron fotografías con el fin de registrar las variables ambientales que intervienen en la peligrosidad geológica. Además, se midió el perímetro del canal principal en la calle Petrolero San Lorenzo mediante cinta métrica para luego hacer una estimación del caudal desarrollado durante las lluvias de 2017.

4.1.2. Trabajo de gabinete

La metodología de trabajo consistió principalmente en la realización de cálculos de parámetros morfométricos, estimación de caudal y mapas temáticos



de las principales variables ambientales, para definir la peligrosidad geológica de la cuenca de Km. 3, de la ciudad de Comodoro Rivadavia, mediante el uso de Sistemas de Información geográficos (SIG), como QGIS 3.6 y ARCGIS 10.5.

A. Cálculo de parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos utilizados son:

- a) Relación de elongación: Se define como el cociente adimensional entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud paralela al cauce principal de esta (Schumm, 1956).
- b) Índice de circularidad: Miller (1953) establece que el índice de circularidad es la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo con el mismo perímetro que la cuenca.
- c) Índice de Gravelius: Este parámetro relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente a la misma (Gravelius, 1914).
- d) Densidad de drenaje: Horton (1932) expresa este parámetro como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cauces y el área de la cuenca.
- e) Frecuencia fluvial: La frecuencia fluvial es el número de cauces por unidad de área (Horton, 1932).
- f) Flujo no encauzado: Es definido como el largo promedio del flujo de agua sobre la superficie que debe recorrer hasta encauzarse en un canal (Horton, 1945).
- g) Relación de bifurcación: Schumm (1956) describe la relación de bifurcación como el cociente entre el número de cauces de un orden “n” y el número de cauces del orden superior.
- h) Infiltración relativa: La infiltración relativa se obtiene mediante el producto de la densidad de drenaje y la frecuencia fluvial.
- i) Relación de relieve: La relación de relieve se obtiene calculando el cociente entre el desnivel de la cuenca y la longitud máxima paralela al cauce principal (Schumm, 1956).
- j) Número de rugosidad: Se define como el producto del desnivel de la cuenca y la densidad de drenaje (Strahler, 1958).



A partir de ellos, se caracteriza el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio.

Los datos necesarios para calcularlos (superficie, perímetro, desnivel, pendiente, número y longitud de cauces) se obtienen a partir del mapeo del sistema de drenaje y divisorias de agua en los SIG (ArcGis 10.5) en formato vectorial. Estos programas, en función de lo mapeado y a través de diversos comandos, realizan el conteo y/o mediciones de estos parámetros mediante la herramienta Calcular geometría, para determinar el área de la cuenca, su perímetro y longitud de cauces, Resumen de estadísticas e identificar, para obtener el desnivel de la cuenca, el número de cauces y su pendiente promedio.

B. Estimación de caudal

La cuenca de Km. 3 no tiene estación de aforo debido a su carácter efímero. Es por esto, y debido a la ineficiencia de varios sistemas de drenaje de la ciudad, se utilizaron tres metodologías de estimación del caudal generado durante las precipitaciones.

La primera de ellas, aplicada en Foix et al. (2017) y Paredes et al. (2017, 2020, 2021), es el cálculo de caudal mediante la expresión matemática $Q = A * V$, donde Q es el caudal en m^3/s , A es el área en m^2 y V la velocidad del flujo de agua en m/s . La sección se determina mediante fotografías y videos sobre la calle Petrolero San Lorenzo durante la lluvia, y posteriormente se realiza la medición en campo. La velocidad se calcula mediante el análisis de videos tomados durante la tormenta aplicando el método del flotador.

El siguiente método es el elaborado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), denominado *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN) (SCS, 1972, ver Mishra y Singh, 2003). Esta metodología se basa en la ecuación del balance de agua y dos hipótesis fundamentales que son: (a) la relación entre la escorrentía superficial (Q) y la precipitación (P); y (b) la relación entre la infiltración (F) y la máxima retención potencial (S).

$$\frac{Q}{P - Ia} = \frac{F}{S}$$

La abstracción inicial (Ia) representa las pérdidas por intercepción, almacenamiento superficial e infiltración. Se obtiene del producto de un coeficiente, generalmente 0.2, y la máxima retención potencial (S).

El parámetro S, se expresa en mm, y depende del tipo de suelo, uso de suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente. Se obtiene de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde CN es el valor de curva número el cual depende del tipo de suelo, tipo de vegetación, uso de suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente. Para hallar el CN es necesario establecer la condición de humedad antecedente que refiere a la cantidad de humedad que tiene el suelo teniendo en cuenta la cantidad de milímetros precipitados cinco días antes y la estación del año de la tormenta a evaluar (**Tabla 1**).

| Condición de humedad antecedente | Precipitación total antecedente de 5 días (cm) | |
|---|---|---|
| | <i>Estación inactiva (Otoño-Invierno)</i> | <i>Estación de crecimiento (Primavera-Verano)</i> |
| I | <1.3 | <3.6 |
| II | 1.3 – 2.8 | 3.6 – 5.3 |
| III | >2.8 | >5.3 |

Tabla 1. Condición de humedad antecedente en los cinco días previos a la tormenta de análisis (Mishra y Singh, 2003).

Asimismo, deben clasificarse los distintos tipos de suelo según grupos hidrológicos basados en las tasas de infiltración (**Tabla 2**). Los grupos hidrológicos se dividen en A, B, C y D.

- El grupo A tiene altas tasas de infiltración por lo que producen poca escorrentía superficial. Estos incluyen suelos profundos, buenos a excesivamente drenados como arenas y gravas.
- El grupo B tiene tasa moderadas de infiltración. Incluye rocas de tipo loess y areno arcillosas.
- El grupo C tiene tasas bajas de infiltración. Consta de suelos finos como arcillas limosas, areno arcillosas poco profundos y con poco contenido de materia orgánica.
- El grupo D tiene tasas de infiltración muy bajas. Se caracteriza por suelos arcillosos, suelos poco profundos cercanos a capas impermeables.



| Grupo Hidrológico | Tasa de infiltración mínima (cm/h) |
|-------------------|------------------------------------|
| A | 0.762 – 1.143 |
| B | 0.381 – 0.762 |
| C | 0.127 – 0.381 |
| D | 0 – 0.127 |

Tabla 2. Grupos hidrológicos definidos según tasa de infiltración (Mishra y Singh, 2003).

En función de los datos de condición de humedad antecedente y los grupos hidrológicos se procede a mapear los usos de suelo para luego identificar los CN (**Tabla 3**). En un SIG, deben definirse los polígonos de cada CN dentro de la cuenca y medir el área de estos para luego realizar una media ponderada y obtener el CN de toda la cuenca. Lo mismo se aplica en el caso de trabajar con subcuencas.

$$CN = \sum \frac{A * CN}{At}$$

Una vez obtenido el CN se realiza el cálculo de escorrentía superficial que se desprende de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

El resultado Q se expresa en mm. De esta manera se descuentan las pérdidas de la precipitación total y el sobrante, o mejor llamado, precipitación efectiva que es la cantidad de agua disponible para el escurrimiento superficial.

| Uso de suelos | Condición hidrológica/ % área impermeable | Grupos Hidrológicos | | | |
|---|--|---------------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Urbano | | | | | |
| Residencial: | | | | | |
| Tamaño del lote: | | | | | |
| 506 m ² o menos | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 1012 m ² | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 1335 m ² | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 2023 m ² | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 4046 m ² | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 8093 m ² | 12 | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Estacionamientos, techos, etc. | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y rutas: | | | | | |
| Pavimentada con cordón cuneta y alcantarillas | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Pavimentada con zanjas | | 82 | 89 | 92 | 93 |
| Grava | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Tierra | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Distrito Urbano: | | | | | |
| Comercial | | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Industrial | | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Áreas de desarrollo | | | | | |
| Áreas nuevas sin vegetación | | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Espacios abiertos, parques, etc.: | | | | | |
| Cobertura de césped >75% | Buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Cobertura de césped entre 50 y 75% | Media | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Vegetación | | | | | |
| Zonas áridas a semiáridas: | | | | | |
| Herbáceas | Pobre | | 80 | 87 | 93 |
| | Media | | 71 | 81 | 89 |
| | Buena | | 62 | 74 | 85 |
| Álamo-Roble | Pobre | | 66 | 74 | 79 |
| | Media | | 48 | 57 | 63 |
| | Buena | | 30 | 41 | 48 |
| Pinos | Pobre | | 75 | 85 | 89 |
| | Media | | 58 | 73 | 80 |
| | Buena | | 41 | 61 | 71 |
| Arbustos | Pobre | 63 | 77 | 85 | 88 |
| | Media | 55 | 72 | 81 | 86 |
| | Buena | 49 | 68 | 79 | 84 |

Tabla 3. Tabla de Curva Número (CN) en relación con el uso de suelos.

Para obtener el caudal máximo se debe utilizar un hidrograma unitario de forma triangular, mediante el cual se determina el tiempo al pico del hidrograma



real, y a partir de este último, el caudal máximo. Para ello se aplican las siguientes fórmulas:

$$T_p = \frac{t_c + 0.133t_c}{1.7}$$

Donde T_p es el tiempo al pico en horas y t_c el tiempo de concentración en minutos.

$$Q_p = \frac{0.208 * A * Q}{T_p}$$

Donde Q_p es el caudal máximo en m^3/s , A es el área de la cuenca y Q la escorrentía superficial en mm.

Por último, se utilizó un método de modelado hidrológico llamado HEC-HMS 4.5. Este es un *software* desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos con el fin de simular procesos de precipitación-escorrentía en cuencas hídricas (Feldman, 2000).

Este programa da como resultado un caudal máximo en m^3/s , tiempo al caudal máximo en horas y, de forma gráfica, un hidrograma. Para ello, necesita de la configuración de cuatro ítems principales: modelo de cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control e Información de series temporales. El modelo de cuenca consiste en la conectividad entre cuencas y subcuencas, y factores de escorrentía; el modelo meteorológico utiliza datos de precipitación, evapotranspiración y deshielo; las especificaciones de control determinan el tiempo de comienzo y fin de simulación; la Información de series temporales es el lugar donde se cargan, por ejemplo, hietogramas (Natajaran y Radhakrishnan, 2019).

La obtención del caudal máximo se da por la aplicación de diversos métodos de pérdida y transformación, en este caso se utiliza el de la SCS CN y el hidrograma unitario de la SCS, respectivamente.

C. Estimación de caudal del sistema de drenaje urbano

El cálculo de la capacidad máxima de drenaje de los pluviales se realizó mediante la ecuación de Manning (Manning, 1891).

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$



Donde Q es el caudal estimado en m^3/s , n el coeficiente de rugosidad de Manning, A el área del pluvial en m^2 , R el radio hidráulico en m y S la pendiente en m/m . El área de los pluviales fue aportada por la Dirección General de Proyectos de Redes Públicas y Sistema Hídrico de la Municipalidad de Comodoro Rivadavia. El coeficiente de Manning para superficies de hormigón es de 0.013. La pendiente fue calculada por el cociente entre la diferencia de desnivel desde el principio al final de los pluviales y la longitud entre esos puntos.

D. Procesos geodinámicos y urbanización

Muchos de los procesos que ocurren sobre la superficie de la cuenca de drenaje como cárcavas, deslizamientos, inundación y erosión costera son señalados mediante la comparación temporal de imágenes satelitales de Google Earth™, fotografías de los resultados de la tormenta y una fotografía aérea vertical del año 1970 del Instituto Geográfico Militar (IGM). La misma metodología se aplica para analizar el avance de la urbanización.

E. Mapas temáticos

La generación de un mapa de peligrosidad geológica precisa la confección previa de cartografía que representen distintas variables ambientales que interactúan en el área de estudio, como los siguientes:

- a) mapa hidrológico, con cauces fluviales y límite de cuenca
- b) mapa de zona de influencia fluvial
- c) mapa geológico
- d) mapa geomorfológico
- e) mapa de pendientes
- f) mapa de cobertura vegetal
- g) mapa de procesos antiguos, activos y potenciales

Metodología para la confección de cada variable:



a) Mapa hidrológico, con cauces fluviales y límite de cuenca

El mapa de cauces es un *shapefile* (archivo de forma) de tipo vectorial polilínea en el que se mapean manualmente el límite de la cuenca de drenaje y todos sus tributarios. Para ello se utiliza un mapa base (XYZ Tiles) con imágenes de Google Earth™ y curvas de nivel obtenidas mediante un *drone*, con una equidistancia de 5 m, sobre la plataforma QGIS 3.6. Cada uno de los tributarios se clasifica por orden de cauce según Strahler (1956). Los datos obtenidos son útiles para el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca.

b) Mapa de zona de influencia fluvial

La confección del mapa de influencia fluvial se realiza a partir del mapa de cauces antes mencionado. Consiste en la creación de una zona *buffer* o zona de influencia con centro en los tributarios. Para ello se utiliza el comando *buffer* en ArcGis 10.5 que genera polígonos de manera automática con un ancho de 20 m, establecido a criterio del autor en función del ancho de afectación que provoca el flujo de agua mayor al de las calles, avenidas y cauces/cárcavas. Esta zona de influencia se corresponde con lo que luego se denomina en este trabajo, flujo encauzado. El resto del área de la cuenca se divide en flujo no encauzado y flujo subordinado en área urbana. Asimismo, se demarcan las áreas que representan posibilidad de inundación. Estas se confeccionan a través de la delimitación de sectores de 0° de inclinación tomados del mapa de pendientes, y, de todas ellas, se seleccionan solo las secciones que tuvieron alguna denuncia de ingreso de agua (tomado de los datos proporcionados por el LabSIG – UNPSJB registrados entre el 4 de abril de 2017 al 7 de mayo de 2017).

c) Mapa geológico - geomorfológico

Se realiza el mapeo a través de polígonos de las unidades geomorfológicas y geológicas a partir de imágenes de Google Earth™ tomando como base la Carta Geoambiental de Comodoro Rivadavia (Hirtz et al., 2000a), el reconocimiento y relevamiento de dichas unidades en sitios específicos del terreno, ej. deslizamiento de la Caballeriza y barrio Divina Providencia, deslizamiento barrio Sismográfica - El Marquesado y bibliografía específica al respecto, particularmente de la Cátedra de Geología Aplicada UNPSJB y SEGEMAR.



d) Mapa de Pendientes

Mediante el *software* ArcGis 10.5 y a partir de las curvas de nivel se realiza una triangulación de los valores de altitud, obteniendo como resultado una imagen en formato TIN. Previo a su concreción deben modificarse manualmente algunas de las curvas de nivel debido a que los edificios y la vegetación generan distorsiones en el producto final, denotándose una incongruencia con la pendiente real. Luego, se hace la conversión de TIN a Raster con el fin de elaborar el Modelo de Elevación Digital (MED). Finalmente, se efectúa el mapa de pendientes a través de la herramienta *Slope*.

e) Cobertura vegetal

Para la obtención del mapa de cobertura vegetal se utiliza la imagen satelital Sentinel 2 T19GFK_20190808T141051 de 10 m de resolución espacial adquirida el 8 de agosto de 2019. A partir de ellas se genera una composición RGB 842 con el fin de resaltar la vegetación. Luego, se realiza una clasificación supervisada con la herramienta Clasificación supervisada interactiva en ArcGis tomando al menos 10 áreas de muestra para cada unidad de cobertura (nula, baja, moderada y alta cobertura vegetal), las cuales fueron determinadas de forma visual. Una vez que el *software* realiza la clasificación en toda el área de la cuenca, sobre cada una de las unidades se realizan 10 transectas con una longitud fija de 100 m que se disponen aleatoriamente, tanto en posición como en orientación sobre imágenes satelitales de Google Earth™. La cobertura vegetal es equivalente a la porción de la longitud total que es interceptada por la transecta y responde a la siguiente fórmula mencionada en Matteucci y Colma (1982):

$$xi = \left(\frac{li}{Lt} \right) * 100$$

Donde xi es el porcentaje de cobertura vegetal de la transecta, li la longitud que ocupa la vegetación y Lt la longitud total de la transecta.

Por último, se realiza el cálculo de promedio de todas las transectas de cada unidad.

f) Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales

El mapa de procesos antiguos, activos y potenciales se realiza en base a los mapas de relevamiento de daños confeccionados por el Laboratorio de



Información Geográfica (LabSIG) de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB). La base de datos del LabSIG se obtuvo mediante la realización de encuestas a vecinos con posterioridad al evento catastrófico generado por la tormenta de marzo/ abril de 2017, utilizando un formulario difundido por WhatsApp, donde se indicó: dirección, nombre y apellido, teléfono y daños causados por el evento excepcional; que en una segunda instancia se reemplaza por la aplicación “temporal-CR2017” publicada en la PlayStore de Google (ver Diez Tetamanti y Schuler, 2019). En el mismo se registran los datos enviados por los vecinos durante el temporal de 2017 en el que se mencionaron los daños ocasionados y su ubicación geográfica. A partir de éstos se mapearon zonas de conflicto en la cuenca de Km. 3 como cárcavas, desmoronamiento, daños por ingreso de agua y anegamiento. Las áreas que no entran en estas categorías se catalogan como áreas sin registro.

Además, se utilizan los datos de otros trabajos realizados sobre la misma área de estudio relacionados a la peligrosidad geológica como González et al. (2002), Hirtz (2003), Tchilinguirian (2003) y Vidal (2018), a fin de complementar con la información brindada por el LabSIG.

g) Confección del mapa de peligrosidad geológica

A través de las herramientas propias de los SIG se combinan de manera ponderada los mapas que representan las seis variables ambientales, y se elabora un mapa integrado de peligrosidad, detallado y actualizado sobre la totalidad de la cuenca de Km. 3.

La metodología utilizada consistió en realizar la combinación de los mapas, a través del comando Suma Ponderada de ArcGis 10.5. Para ello, es necesario convertir las capas de entrada (variables ambientales) de un formato tipo Vectorial a uno tipo Raster. Dentro de cada capa existen distintos criterios o unidades que son representados por celdas o píxeles. Las mismas fueron calificadas en función de la valoración propia sobre cada una de ellas, que es determinada por un rango de valores, desde el más favorable: 9, al menos favorable: 1, en relación con la peligrosidad geológica. Es decir, se asigna un valor de 9 a las celdas que representen una baja peligrosidad geológica, y 1, a las de alta peligrosidad. Posteriormente, se establece un valor numérico que determina el peso o influencia de cada una de estas variables ambientales para

obtener la combinación final, dando como resultado el mapa de peligrosidad geológica, confeccionado en base a la definición de cinco zonas, que van de peligrosidad Muy Baja a Muy Alta, como se explica en el apartado correspondiente (**Fig. 1**).

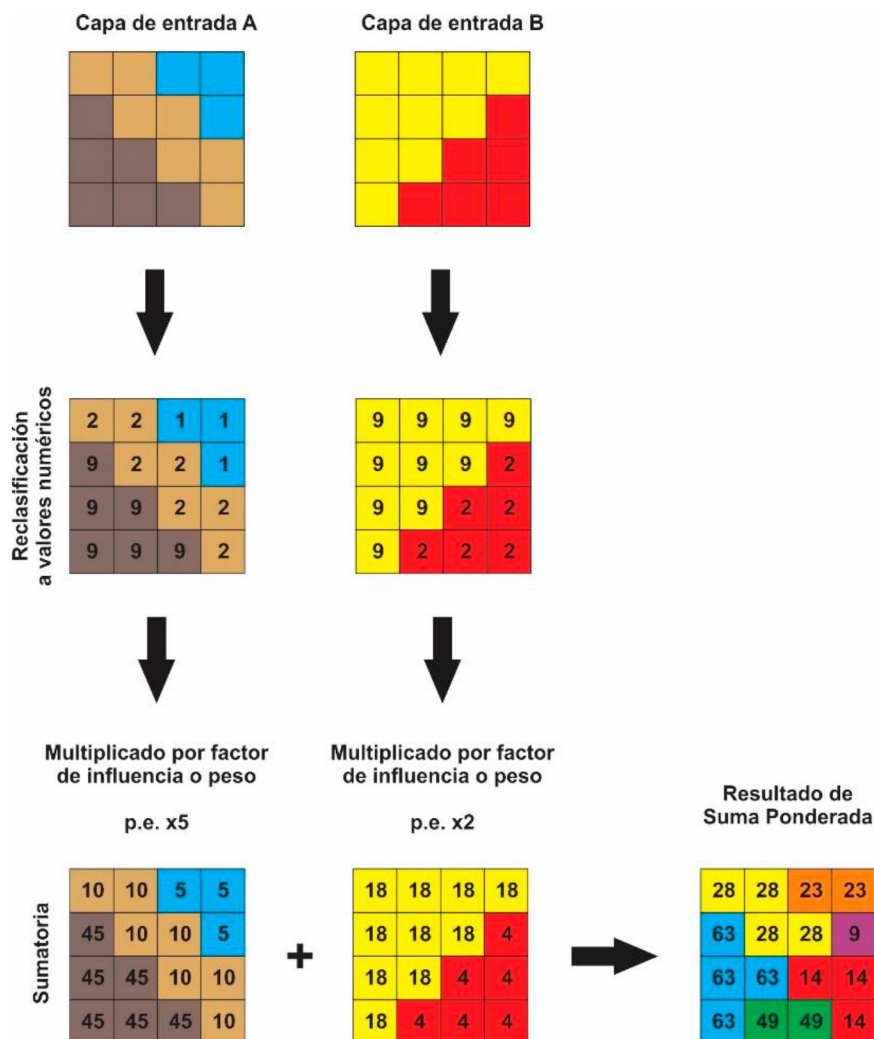


Figura 1. Esquema de las etapas para la confección del mapa de peligrosidad.

F. Encuestas a vecinos de la zona afectada

Además del trabajo técnico antes mencionado, se realizó una encuesta a los vecinos de Km. 3 con un alcance de 40 personas, de las cuales 35 respondieron las preguntas. La encuesta se divide en tres partes, el antes, durante y después de la tormenta de 2017. Las preguntas son las siguientes:

ANTES:

1. Ubicación



2. ¿Cómo fueron las alertas previas a la tormenta desde municipalidad, medios de comunicación, defensa civil, etc.?

DURANTE:

3. ¿Qué medidas de prevención tomó? ¿Conocía alguna?

DESPUÉS

4. ¿Qué puede ver del "día después"? ¿Hubo soluciones? ¿Cree que puede volver a ocurrir?

Las mismas fueron difundidas a través de la aplicación WhatsApp o por llamadas telefónicas. Las respuestas de las encuestas fueron reclasificadas para poder representarlas en gráficos de torta para una mejor visualización de los datos obtenidos.

5. ÁREA DE ESTUDIO

La presente tesis de grado tiene como área de estudio la cuenca de drenaje de Km. 3 de la ciudad de Comodoro Rivadavia (**Fig. 2b**), ubicada en el extremo sureste de la provincia de Chubut (**Fig. 2a**). Sobre ella se emplaza el popularmente denominado “barrio de Km. 3”, el cual consiste en un aglomerado de “microbarrios” integrado por: General Mosconi, Divina Providencia, Saavedra, Extensión de Saavedra, Chacras de Saavedra, Médanos, Sismográfica, Marquesado, Los Tilos, Ameghino, Extensión de Ameghino, Moreno, Belgrano Nuevo, Militar Oeste y 25 de Mayo (**Fig. 2c**).

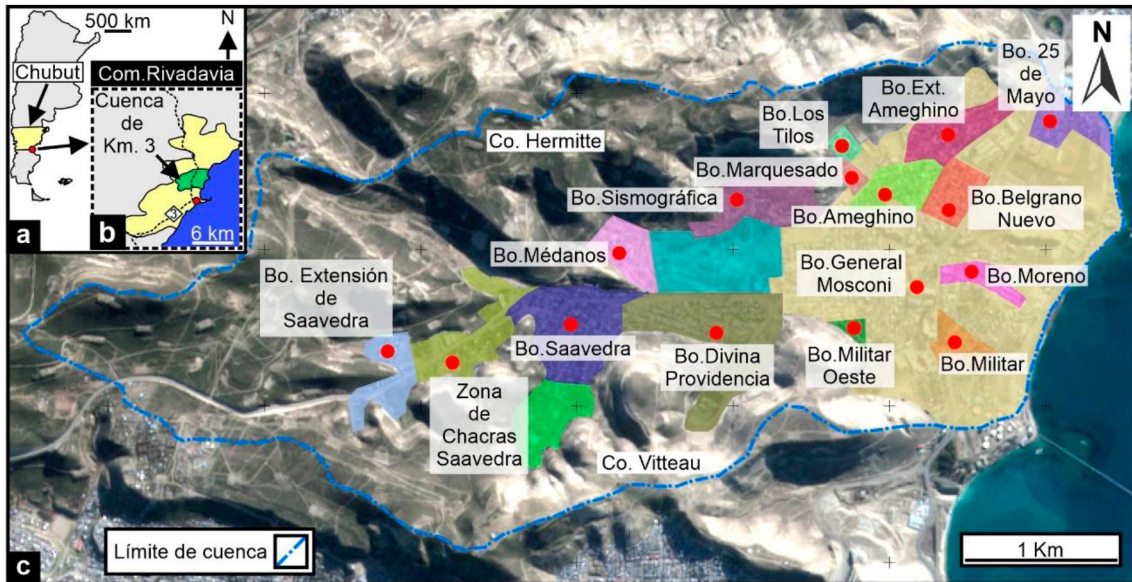


Figura 2. Ubicación del área de estudio. a) Ubicación de la Provincia de Chubut. b) Ciudad de Comodoro Rivadavia, se señala ubicación de la cuenca de Km. 3. c) Cuenca de Km. 3. Se observa el aglomerado de microbarrios.

6. ANTECEDENTES

6.1. Geología Regional

La cuenca de Golfo San Jorge se encuentra limitada, al norte, por el Macizo de Somuncurá, y al sur, por el Macizo del Deseado.

El basamento Jurásico se compone de basaltos, riolitas, ignimbritas y rocas volcanosedimentarias, de los grupos Lonco Trapial (Lesta y Ferello, 1972) y Bahía Laura (Feruglio, 1949). A estas le sigue el Grupo Las Heras (Lesta et al., 1980) que se componen de depósitos lacustres que rellenan hemigrábenes. Por encima, se ubica el Grupo Chubut (Lesta y Ferello, 1972), de edad Cretácica, el cual comienza con los depósitos lacustres de la Formación Pozo D-129 (Clavijo, 1986) y con las sedimentitas fluviales de la Formación Matasiete (Sciutto, 1981). Ambas unidades son cubiertas por la Formación Castillo (Lesta, 1968), caracterizada por sistemas fluviales con un importante contenido piroclástico, de edad Cretácico inferior, dominadas por una tectónica extensional y trastensional. Luego ocurre un período de subsidencia termal donde se depositan las rocas de la Formación Bajo Barreal (Lesta, 1968), compuesta por una sección basal tobácea y la superior pelítica de origen fluvial. El registro del Paleoceno comienza con la primera transgresión marina del océano Atlántico representadas por las rocas de la Formación Salamanca (Lesta y Ferello, 1972) que más tarde dan



lugar a los depósitos continentales del Grupo Río Chico (Legarreta y Uliana, 1994) de edad Paleoceno superior – Eoceno Medio. Sobre estas se encuentra la Formación Sarmiento, la cual consiste en depósitos de tobas provenientes del Arco Magmático Andino. La Formación Chenque (Bellosi, 1990) se apoya sobre la anterior y se conforma por sedimentos de origen marino (Mioceno inferior a medio) que gradan a depósitos fluviales y eólicos de la Formación Santa Cruz (Feruglio, 1949). Por último, se depositan los “Rodados Tehuelches” que constituyen sistemas fluviales asociados al derretimiento de glaciares en el Plioceno y Pleistoceno.

6.2. Geología local

La cuenca de Km. 3 se encuentra conformada por rocas sedimentarias de la Formación Chenque (Bellosi, 1990) y depósitos modernos inconsolidados, con algunos pocos afloramientos de la Formación Sarmiento (Ameghino, 1906; Windhausen, 1924; Feruglio, 1938) (**Fig. 8**).

Los afloramientos de la Formación Sarmiento, de edad Eoceno y Oligoceno, se ubican sobre el sector costero de la cuenca. Sus rocas se caracterizan por ser niveles tabulares blanco amarillentos compuestos por cenizas volcánicas finas que, en los sectores de mayor exposición, desarrollan paisajes tipo *badlands* (Paredes et al., 2017). Representan ambientes de depositación continentales como fluviales, llanuras aluviales con contenido de peces, anfibios, reptiles, nidos de escarabeidos y véspidos, y estructuras vegetales (Sciutto et al., 2008).

La Formación Chenque aflora en sectores de alta pendiente y en la parte superior de las mesetas. Se compone por sedimentitas marinas, principalmente areniscas gris verdosas que varían de medianas a muy gruesas, arcilitas plásticas alteradas, material piroclástico, conglomerados y bancos de coquinas, en general, dispuestos en la cima de las mesetas (Sciutto et al., 2008).

Bellosi (1987, 1990) y Bellosi y Barreda (1993) reconocen cinco secuencias depositacionales regresivas, que internamente se ordenan en ciclos granocrecientes. Estos depósitos se vinculan a ambientes de plataforma fangosa a facies litorales y estuáricas.

Paredes (2002) reconoce cuatro secuencias depositacionales. La primera secuencia inicia con un depósito transgresivo basal compuesto por pelitas y



areniscas bioclásticas, por sobre la Formación Sarmiento, al que le sigue una columna de pelitas que gradan a areniscas conformando un arreglo progradacional, en la que pueden hallarse intercalaciones de niveles bioclásticos y depósitos de tormenta. Estas características se interpretan como sistemas regresivos en un cortejo de nivel del mar alto (Paredes, 2002). La segunda secuencia depositacional comienza con depósitos en condiciones submareales a intermareales de areniscas con tendencia granodecreciente, donde se reconocen areniscas glauconíticas y desarrollo de *hardground* con icnofacies de *Thalassinoides* y de *Skolithos*, evidencias que indican poco o nulo aporte sedimentario (Paredes, 2002). Estos depósitos se interpretan como el inicio de un cortejo transgresivo, mientras que hacia la parte superior se hallan ambientes de mayor energía (Paredes, 2002). En contacto neto se depositan bancos de pelitas que corresponden a un cortejo de nivel del mar alto con al menos dos ciclos internos, granocrecientes, progradacionales y somerizantes, atribuidos a un relleno de estuario en condiciones progradacionales (Paredes, 2002). La tercera secuencia se desarrolla a partir de un conjunto de facies granodecrecientes que comienzan con conglomerados polimícticos que gradan a areniscas medianas (Paredes, 2002). Le sigue un desarrollo de *hardground*. Se interpreta como un cortejo transgresivo y un cortejo de nivel del mar alto (Paredes, 2002). La cuarta secuencia depositacional inicia nuevamente con un conglomerado polimíctico que representa un relicto de un cortejo transgresivo (Paredes, 2002). Luego le siguen sistemas progradantes que se interpretan como un estadio de nivel del mar alto. En general, estas secuencias, corresponden a depósitos de plataforma interna que varían a ambientes submareales a intermareales (Paredes, 2002).

Cuitiño (2015) le asigna una edad de 15 a 19 Ma a partir de edades $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ obtenido de valvas de ostreas.

Sobre el sitio de estudio, Hirtz (2003) describe las dos secuencias depositacionales inferiores sobre el Cerro Hermitte. La primera secuencia se compone por arcilitas y arcilitas tobáceas gris verdosas y gris amarillentas intensamente alteradas y fracturadas, intercaladas por areniscas y areniscas calcáreas; a las que por encima le siguen 25 metros de areniscas. La segunda secuencia comienza con arcilitas, por encima pasa a areniscas y finaliza con un banco de coquinas.

Los depósitos modernos se encuentran tapizando las laderas de los cerros cubriendo la Formación Chenque y el fondo de la cuenca de Km 3. Principalmente se tratan de depósitos pséfiticos y psamopelíticos, en los que se encuentran clastos de procedencia volcánica de tamaño medio a grueso con matrix arenosa que generalmente yacen sobre niveles terrazados y limos, limos arcillosos y arenas finas provenientes de sedimentos de talud, fluviales recientes y fluvioeólicos, respectivamente (Hirtz et al. 2000a). Se mapean como sedimentos finos aluviales y depósitos de talud sobre Formación Chenque (Hirtz et al. 2000a). Estos materiales son muy friables, con estructuras sedimentarias muy sensibles a la disgregación y asentamiento bajo condiciones de saturación (Tchilinguirian, 2003).

En acuerdo con lo antes mencionado, Paredes et al. (2017) agrega que los espesores de estos depósitos varían desde pocos centímetros y más de 3 metros en las laderas, pero que pueden superar los 15 metros en los fondos de los cañadones. Estos últimos son afectados por la acción del viento que produce una importante removilización y depositación de arenas y limos (Montes et al. 2015).

La zona urbana se asienta sobre materiales de relleno que surgen de la mezcla de los sedimentos aluviales-coluviales con los de la Formación Chenque (Tchilinguirian, 2003).

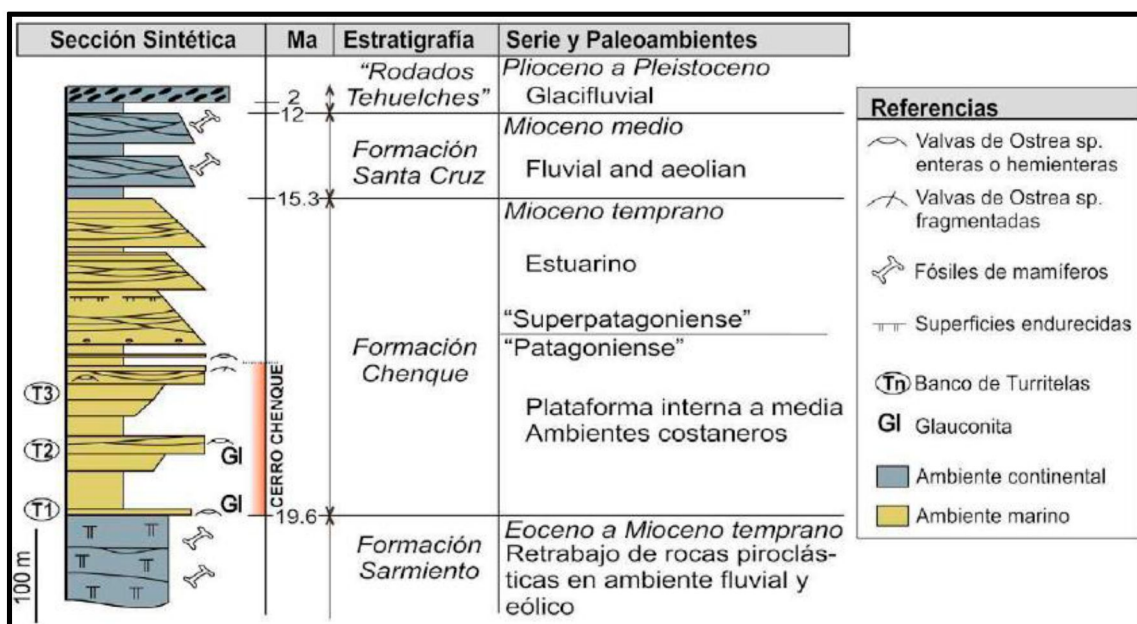


Figura 3. Perfil estratigráfico del sitio de estudio (Hirtz et al. 2019).



6.3. Geología estructural

La cuenca de Km. 3 se encuentra delimitada por un sistema de fallas normales, denominadas A y B de rumbo este-oeste (**Fig. 4**) reconocidas por Feruglio (1949). Hacia el norte del sitio de estudio se encuentra la falla C que es una de las más importantes alcanzando niveles del “Neocomiano” y del basamento geológico de la Cuenca del Golfo San Jorge (Giacosa et al., 2004).

Dentro del cañadón de Km. 3, Giacosa et al. (2003, 2004) describen la falla A o Vitteau como una falla normal planar, antitética a la falla C, que logra alcanzar los estratos de la Formación Comodoro Rivadavia. El desplazamiento en niveles de la Fm. Chenque es de aproximadamente 23 metros y su plano inclina $75^{\circ}/N15^{\circ}$ con una delgada zona de falla menor a 10 centímetros constituida por arcillas y yeso (Giacosa et al., 2004). Posiblemente, el desarrollo de esta falla implica una estructuración del terreno de las áreas aledañas por donde se supone se encuentra su trayectoria, y esto genera predisposición a asentamientos del suelo, y, en consecuencia, afectación sobre estructuras urbanas (Vidal, 2018)

La falla B es una falla extensional que inclina 60° hacia el sur (González et al., 2002). La misma corta la ladera sur del Cerro Hermitte y se la vincula como un factor primordial para el movimiento de ladera en el que se ubica el barrio Sismográfica y Marquesado (González et al., 2002; Hirtz, 2003).

Asimismo, existen fallas extensionales en la Fm. Chenque de menor magnitud o mesoscópicas generalmente rellenas de yeso y dispuestas con amplia dispersión de rumbos. El cálculo de *paleostress* da como resultado una orientación de σ_3 semiperpendicular a las fallas mayores o megascópicas, como las fallas A y B (Oporto et al., 2022). Estas últimas, durante su reactivación en el Mioceno, perturban el campo de esfuerzo regional ($\sigma_3=354^{\circ}$) y ocasionan que las fallas mesoscópicas generadas tengan variadas orientaciones semiparalelas a las fallas mayores, con una extensión norte - sur, aproximadamente (Oporto et al., 2022).

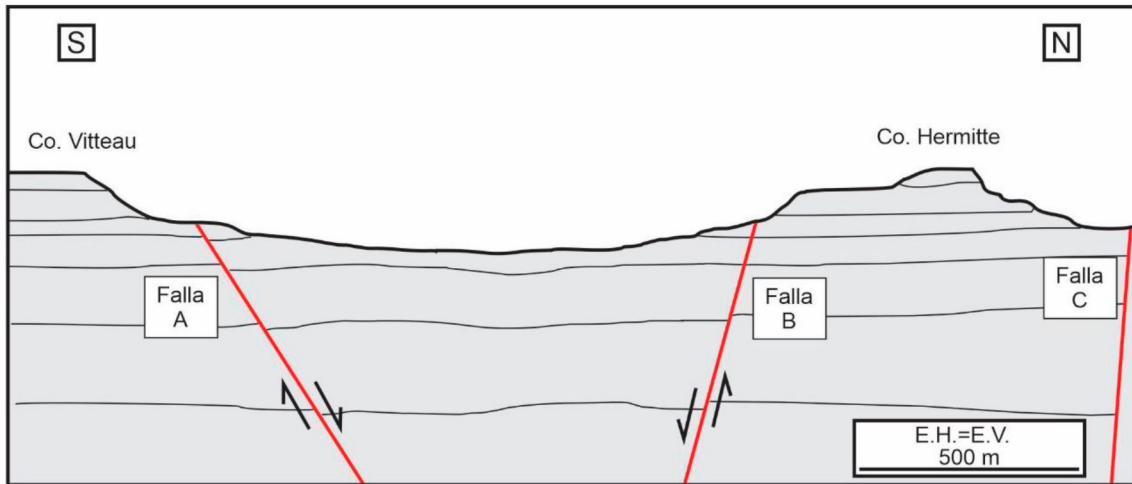


Figura 4. Esquema del perfil estructural de la zona de estudio. Modificado de Feruglio (1950).

6.4. Geomorfología

A nivel regional, sobre el sector sureste de la provincia de Chubut los rasgos geomorfológicos que se destacan son los relieves mesetiformes, principalmente Pampa del Castillo, y sus “cañadones” asociados.

La Pampa del Castillo es una meseta fluvio-glacial (Césari y Simeoni, 1994, como se citó en Ocampo et al., 2019; Simeoni, 2008) que actúa como una divisoria de agua regional. Este relieve se encuentra disectado por la acción fluvial que da lugar a sistemas de drenaje con pendiente general hacia el este y desembocan en el océano Atlántico.

Los cerros Vitteau, al sur, y Hermitte, al norte, flanquean la cuenca de Km. 3. Son relieves positivos mesetiformes, relictos de los procesos erosivos y de remoción en masa. Se aprecian, asimismo, algunos cortos cañadones transversales, como el que ha sido ocupado con la urbanización del Barrio Saavedra y a menor escala, en sitios específicos de las laderas, se observa la presencia de grandes cárcavas. Estas últimas se desarrollan a partir del escurrimiento superficial, luego de que este alcanza cierto caudal en pequeños surcos que generalmente no contienen flujo perenne. Asociado a las cárcavas en algunos sectores se observa la presencia de hoyos u oquedades llamados *piping* (**Fig. 5**) que se forman de manera subsuperficial en sedimentos friables por infiltración del agua y su consecuente erosión (Tchilinguirian, 2003).



Figura 5. Desarrollo de piping en barrio Sismográfica. Foto tomada de González et al. (2002).

Los taludes de los cerros Hermitte y Vitteau se ven afectados por deslizamientos. El primero de ellos, en el barrio Sismográfica, ya registraba movimiento desde 1918 (González et al., 2002), mientras que el último, ubicado en el sector de la “Caballeriza” se desarrolló como consecuencia de la tormenta entre los días 9 y 10 de abril del 2017. Vidal (2018) determina que el condicionamiento dado por las arcillas altamente alteradas y diaclasadas (paralelas a la pendiente) junto con el agua infiltrada proveniente de las lluvias extremas, proveyeron el debilitamiento necesario para que el terreno se deslice. Los deslizamientos son movimientos gravitacionales que involucran grandes volúmenes de rocas causados por la presencia de pendientes elevadas, materiales arcillosos de la Formación Chenque, y agua que ingresa por grietas que aporta peso y lubrica la superficie de despegue, lo que genera una desestabilización (Ocampo et al., 2019).

Hirtz et al. (2000) valoran la aptitud frente a la urbanización de las distintas unidades geomorfológicas anteriormente descritas según su ubicación con relación a la pendiente. Dentro de la categoría "geoformas sobreelevadas planas" describen como áreas sobreelevadas, planas u onduladas a las terrazas estructurales o mesetas, calificadas con un riesgo geológico medio y como de calidad regular a mala para la urbanización, donde los principales procesos



geológicos que actúan son la deflación y el retroceso de los bordes vinculados a procesos de remoción en masa y erosión hídrica. Las “geoformas de pendiente media a alta” ubican a la unidad “talud escarpado, sobreelevado”. La misma describe al talud superior o ladera de alta pendiente que desciende desde las terrazas estructurales hasta el primer quiebre de pendiente, sobre la que predominan los procesos de remoción en masa, la caracterizan por un alto riesgo geológico y mala calidad para urbanizar (Hirtz et al., 2000a). Las “geoformas de pendiente media a baja” las agrupan a la unidad “pendiente media a baja cubierta con coluvio” y a los “deslizamientos”. La primera describe al sector de talud medio e inferior, los mismos cubiertos por coluvio y arcillas. El aluviamiento y expansividad son procesos bastante generalizados que intervienen sobre sectores de baja pendiente y lóbulos de deslizamiento y reptaje en sectores específicos de pendientes medias, es por esto que la valoran en relación con el riesgo geológico como medio a bajo y aptitud regular a buena para la urbanización, mientras que los “deslizamientos”, descritos anteriormente los califican como un riesgo geológico muy alto, y malos para urbanizar (Hirtz et al., 2000a). Dentro de la categoría “geoformas deprimidas de pendiente baja” determinan la unidad “fondo de valle”, que se constituye con acumulación de sedimentos fluviales finos, en la que actúan los procesos de aluviamiento, erosión y saturación. En cuanto a esto, la valoran como un riesgo geológico medio y buena aptitud para la urbanización a excepción de las zonas con erosión por flujo, anegamiento y depósitos de fangos (Hirtz et al., 2000a).

La costa de Km. 3 se caracteriza por playas de grava con plataformas de abrasión extensas sujetas a inundaciones producto del acenso de las mareas, que en algunos sectores logran alcanzar los acantilados, provocando erosión y retroceso de estos (Hirtz et al., 2000a).

6.5. Clima

Comodoro Rivadavia se caracteriza por un clima árido a semiárido con una temperatura media anual de 12.9°C (Paredes et al., 2017). La temperatura mínima media del mes más frío ronda los 3°C, mientras que la máxima media se da en el mes de enero, alcanzando los 26°C (Servicio Meteorológico Nacional). Las mayores precipitaciones ocurren entre los meses de mayo y junio (**Fig. 6**), alcanzando una media de 239.6 mm/año (Paredes et al., 2017).

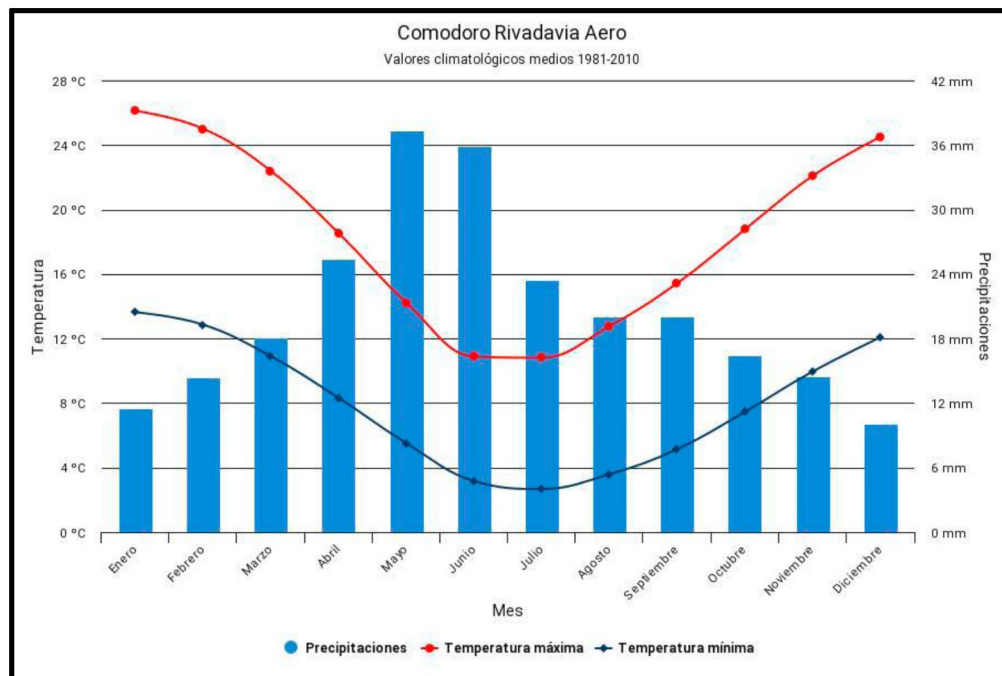


Figura 6. Gráfico de precipitaciones y temperaturas medias de la ciudad de Comodoro Rivadavia del período 1981 a 2010. Tomado de Servicio Meteorológico Nacional.

Los vientos intensos son característicos de esta zona patagónica, prevaleciendo los provenientes del oeste con una velocidad media de 42 km/h, y ráfagas que pueden llegar a superar los 100 km/h. Si bien son constantes durante todo el año, en los meses de verano se intensifican.

6.6. Evolución de la tormenta y sus consecuencias sobre el ejido urbano

Paredes et al. (2017) mencionan que el temporal de lluvias intensas que azotó la ciudad de Comodoro Rivadavia en el año 2017 comenzó días antes del 29 de marzo con la presencia de un banco de neblina y lluvias menores que tuvieron un máximo de 8 mm durante el día 26 de marzo, indicando el acercamiento de un sistema de alta presión sobre la costa Atlántica, tanto de Argentina como Uruguay. Mientras tanto, desde el oeste se aproximaba un sistema de baja presión cargado de humedad, el que se vio obstaculizado por el centro de alta presión en el Océano Atlántico por lo que la tormenta no pudo seguir su camino hacia el mar y se situó sobre Comodoro Rivadavia por aproximadamente dos semanas.

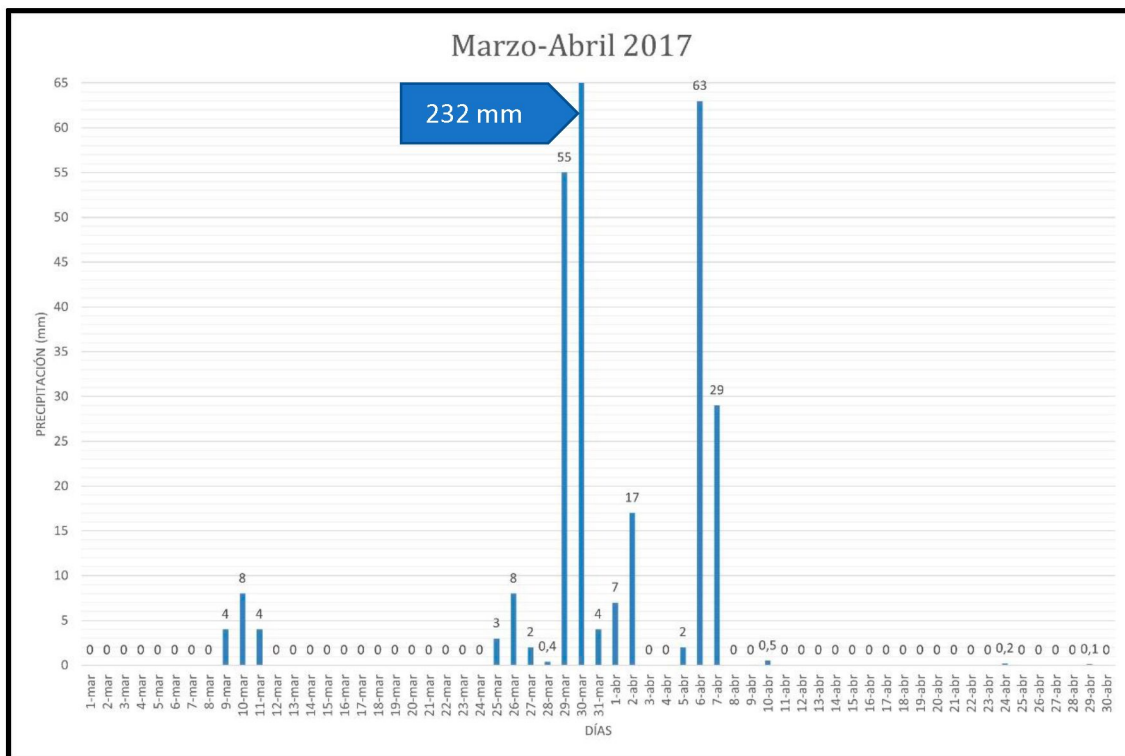


Figura 7. Precipitaciones de los meses Marzo y Abril de 2017. Tomado del Servicio Meteorológico Nacional.

El día 29 de marzo, cerca de las 17:30 comenzó la lluvia con gran intensidad acumulando para el final del día unos 55 mm en el pluviómetro del Aeropuerto Internacional General Mosconi. Al día siguiente, 30 de marzo, se registraron 232 mm en 24 hs, que fueron disminuyendo en los siguientes días a valores de entre 4 y 17 mm, finalizando las precipitaciones el día 3 de abril (**Fig. 7**). La lluvia paró por unos días, lo que dio la posibilidad a la población de Comodoro Rivadavia de sacar agua y barro de sus viviendas hasta el jueves 6 de abril donde la lluvia reapareció y continuo de forma intermitente hasta el 8 de marzo superando los 90 mm acumulados entre estos días. Esta precipitación ocurrió sobre suelos saturados producto de las lluvias previas por lo que rápidamente se transformó en escorrentía que conllevó en nuevas inundaciones y la removilización de sedimentos (Paredes et al., 2020, 2021). En este tiempo se generaron desastres en distintos puntos de la ciudad. Sus calles actuaron como grandes vías de evacuación hacia las áreas bajas, llevando en su caudal desde basura hasta autos, socavando veredas, aceras y puentes, derrumbando casas donde la erosión de la escorrentía concentrada fue crítica (**Fig. 8**), inundando vastas áreas urbanas con drenaje restringido durante el meteoro, y acumulando barro y agua en los sectores más bajos. De esta manera quedó al

descubierto la incapacidad de los sistemas de drenaje para desalojar la gran cantidad de agua. Los barrios más afectados fueron el Juan XXIII, Laprida, Km. 8, Km. 3, Pueyrredón; y estuvieron aislados debido a la rotura de las rutas el barrio de Caleta Córdova y la ciudad de Rada Tilly. Actualmente en la cuenca de Km. 3, solo se rellenaron las cárcavas del camino a “la Caballeriza”, el camino que une los barrios Laprida y Saavedra, y la avenida Fray Luis Beltrán, esta última a diferencia de las demás, fue asfaltada.

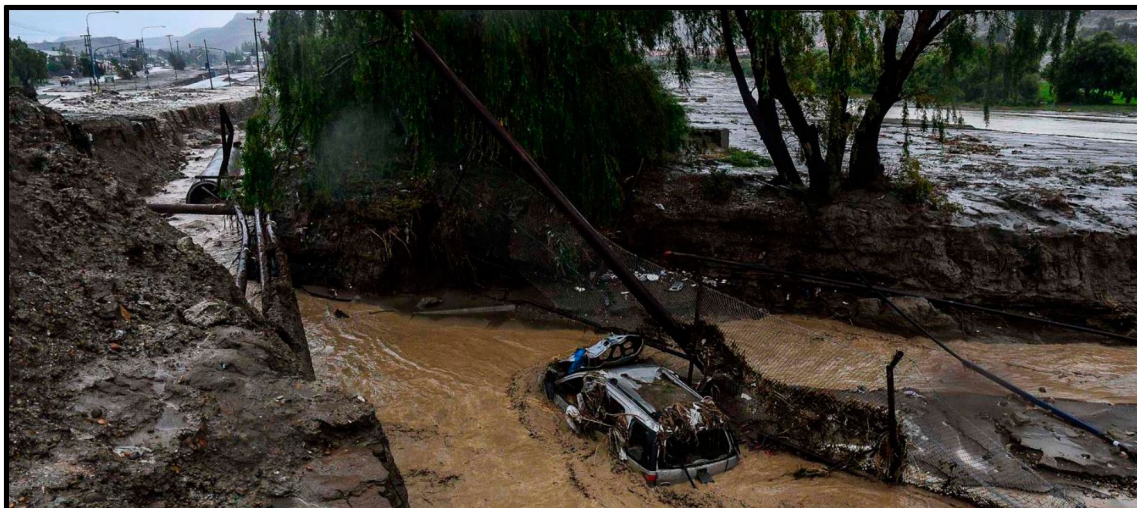


Figura 8. Las aguas erosionaron y desbordaron retomando su cauce natural desde la av. Quintana hacia la calle Petrolero San Lorenzo, en Km. 3, buscando su descarga hacia el mar (Imagen tomada de Infobae, 2017).

7. RESULTADOS

7.1. Encuesta

La encuesta realizada tiene un alcance de 40 personas de distintos sectores de Km. 3. De ellas solo participaron el 87% (**Fig. 9a**). La primera de las preguntas, relacionada a si hubo alertas previas a la tormenta desde medios de comunicación, municipalidad, defensa civil, etc., obtiene como resultado que el 52% de los encuestados reconoce que sí existieron, pero se vieron sorprendidos por la magnitud del evento. El 17% consideró que fueron muy pocas, el 14% duda o no recuerda y, el restante 17%, cree que no existió ningún tipo de alerta (**Fig. 9b**). Las medidas de prevención solo eran conocidas por el 52% de las personas, de las que se destacan la limpieza de desagües, abastecimiento de alimentos, no salir del hogar y no dejar basura en veredas. El resto no implementó ninguna por desconocimiento o por no necesitarlas dadas sus

experiencias previas en otras tormentas (**Fig.9c**). En cuanto a la posibilidad de la recurrencia de este tipo de eventos, el 83% está de acuerdo en que puede volver a ocurrir, el 9% duda, y el 8% no cree que suceda nuevamente debido al carácter extraordinario del mismo (**Fig. 9d**). El 57% de los participantes opina que las obras realizadas hasta el momento son pocas o insuficientes, el 26% que no se han realizado, y el 17% que sí se han ejecutado y son suficientes para nuevas lluvias (**Fig. 9e**). Los daños ocasionados afectaron solo al 22% de los encuestados, siendo estos parciales como el ingreso de agua por patios o filtraciones por techos (**Fig. 9f**).

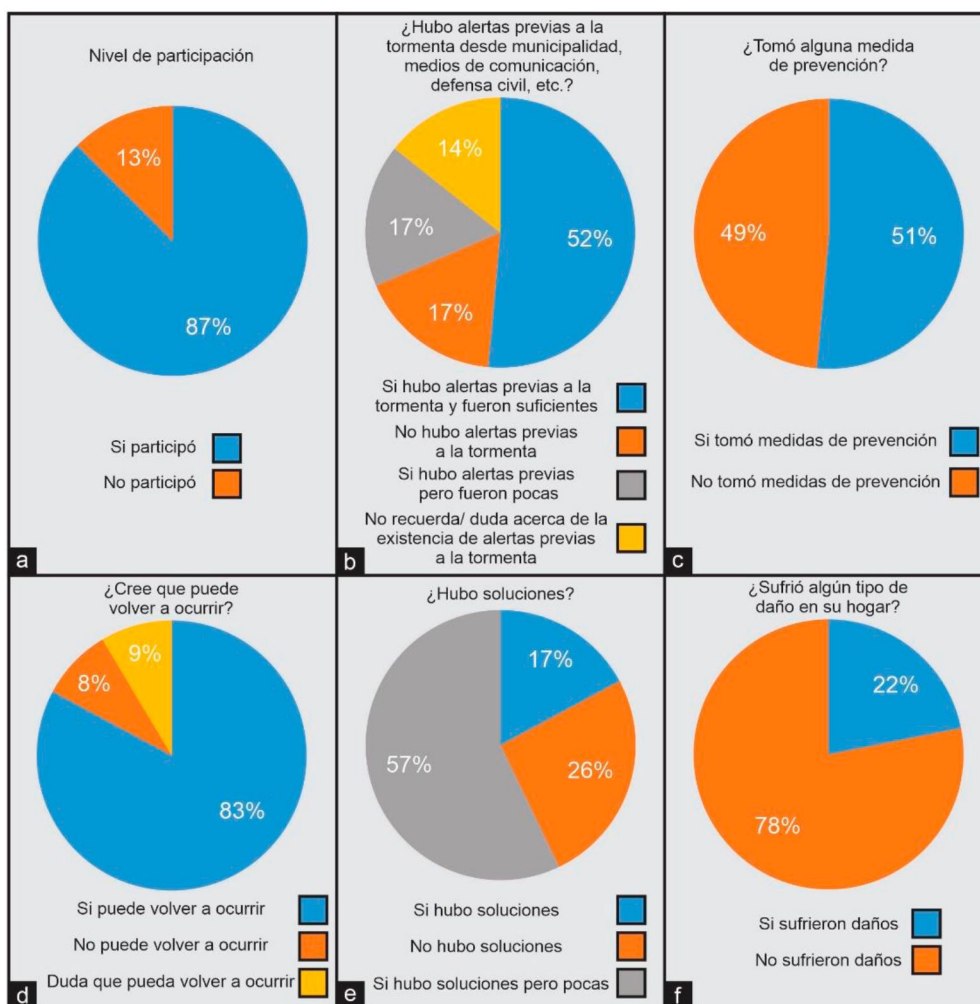


Figura 9. Gráficos de torta que representan las respuestas de los vecinos de Km. 3 a la encuesta realizada. a) Nivel de participación en las encuestas. b) ¿Hubo alertas previas a la tormenta desde la Municipalidad, medios de comunicación, Defensa Civil, etc.? c) ¿Tomó alguna medida de prevención? d) ¿Cree que puede volver a ocurrir? e) ¿Hubo soluciones? f) ¿Sufrió algún tipo de daño en su hogar?

7.2. Sistema Fluvial

La cuenca de Km. 3 es una red de drenaje de pequeñas dimensiones y altas pendientes que se desarrolla sobre los faldeos de los cerros Vitteau y Hermitte (**Fig. 10**). Su eje principal se orienta de manera oeste-este, concentrando progresivamente la escorrentía desde las cabeceras más distantes, ubicadas al oeste, hasta alcanzar su mayor caudal al atravesar la trama urbana del barrio General Mosconi en su descarga hacia el mar. Posee un área de 13.38 km², con un desnivel de aproximadamente 360 m. Las laderas que la envuelven presentan inclinaciones que van desde los 5°, en los sectores bajos, y alcanzan el valor máximo de 63°, en los sitios de mayor altura.

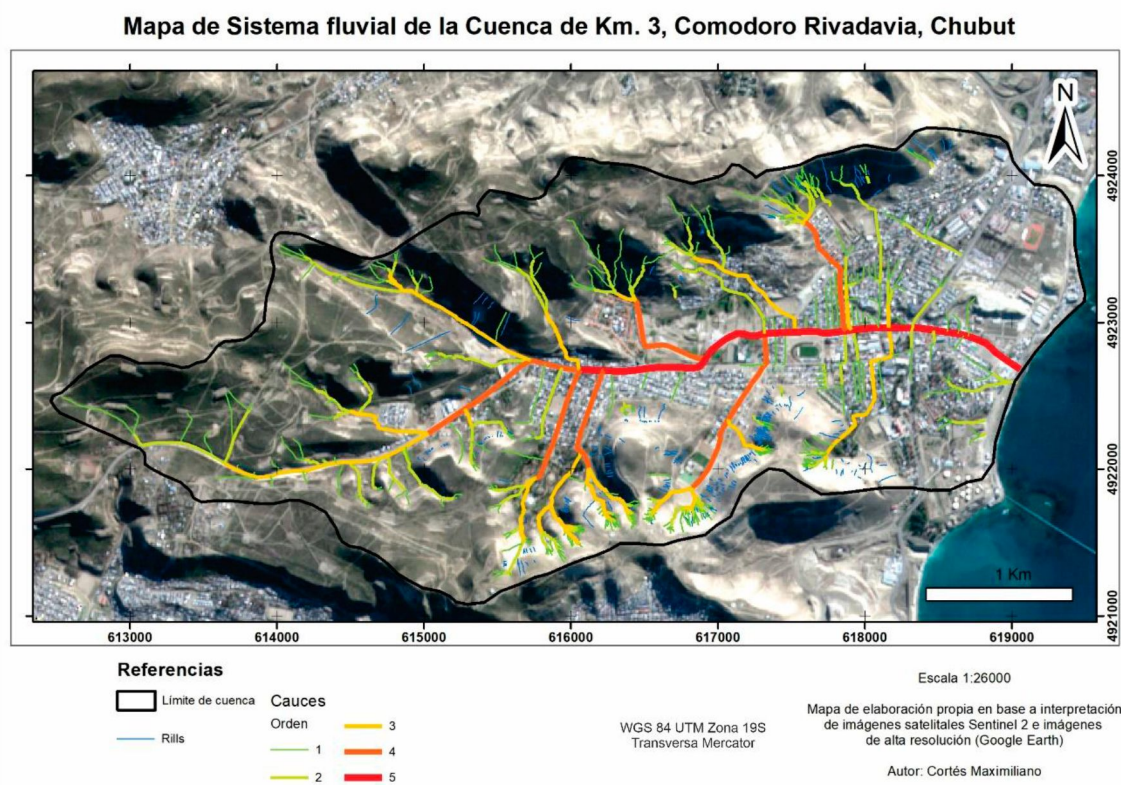


Figura 10. Sistema fluvial de la Cuenca de Drenaje de Km. 3 (Ver en Anexo).

En las cabeceras de la cuenca se desarrolla un sistema de drenaje sobre las rocas sedimentarias de la Formación Chenque y/o depósitos coluviales y aluviales de escaso espesor, con un diseño de tipo dendrítico conformado principalmente por cauces de primer orden. A medida que estos tributarios confluyen en cauces de mayor jerarquía y se integran con la urbanización, su diseño de drenaje cambia a paralelo obedeciendo a las delineaciones propias de las calles. Esto se ve más evidenciado sobre el sector centro-este.



La cuenca alcanza el quinto orden de jerarquía de cauces, según Strahler (1956). El cauce principal posee una longitud de 6.43 km, es monocanalizado y recto. En la mayor parte de su trayectoria atraviesa calles asfaltadas con algunos pocos tramos sin pavimentar.

El sistema de desagüe urbano de la cuenca de Km. 3 inicia desde el oeste a través de canales de hormigón ubicados a ambos lados del camino Roque González. La baja rugosidad de estos y la pendiente hacen que el flujo de agua llegue rápidamente al comienzo de la avenida Fray Luis Beltrán, lugar donde se encuentra con la vertiente del camino que une los barrios Saavedra y Laprida. En esta intersección existe una boca de tormenta que da ingreso al pluvial subterráneo de la av. Fray Luis Beltrán (en dirección oeste – este) hasta ingresar, de forma superficial atravesando sedimentos modernos (coluviales y aluviales antropizados), por parte del terreno perteneciente a “Santa Lucía Golf Club”. Luego, el flujo desemboca en una pileta de decantación ubicada al inicio de la calle Petrolero San Lorenzo, por lo que el sedimento erosionado en la parte alta de la cuenca recorre gran parte de la urbanización. Actualmente se la encuentra fuera de servicio, el flujo de agua la evita a través de ductos plásticos (a modo de *bypass*) y se conecta directamente al pluvial que le continúa. Existe otra pileta de decantación con canales de guarda de hormigón que se sitúa entre la ladera del cerro Vitteau y el barrio Divina Providencia. Ésta evita rápidamente que los sedimentos ingresen a la urbanización, a diferencia de la anterior. A continuación de la primera pileta mencionada, el flujo de agua ingresa a un pluvial subterráneo con un diámetro de entrada de aproximadamente 0.55 m, que inmediatamente aumenta a 1.2 m y a mitad de recorrido pasa a una sección rectangular de 1.8 m x 0.8 m. Se extiende por dicha arteria captando el escurrimiento lateral, principalmente de la vertiente norte, mediante bocas de tormenta hasta llegar a la alcantarilla (3 m x 1.5 m) (**Fig. 11a, b**) ubicada en la depresión previa a la Ruta Nacional N°3. Esta última, receptiona el flujo superficial proveniente de la avenida Tehuelches y lo une al anterior subterráneamente para dirigir el flujo hacia el mar, en este caso, por un ducto con un área rectangular de 4 m x 2.2 m.



Figura 11. Estado de la boca del pluvial próximo a Ruta Nacional N° 3. a) Fotografía tomada al momento del máximo nivel alcanzado por el agua. b) Alcantarilla obstruida parcialmente por un vehículo que fuera arrastrado durante la tormenta. Puede observarse el nivel máximo alcanzado por el agua (2.2 m).

En relación con el sistema fluvial y su respuesta frente a fenómenos hidrometeorológicos es necesario destacar la importancia de los procesos desencadenados que tuvieron lugar durante el temporal de 2017. En cualquier red de drenaje donde el agua fluye por sus cauces, en general, se desarrolla erosión en las zonas altas la cual pone a disposición los sedimentos que luego son transportados hasta la zona baja de la cuenca, lugar donde se produce su depositación. En la cuenca de estudio, a raíz de la tormenta de 2017, la erosión hídrica expresada principalmente por el desarrollo y crecimiento de cárcavas fue de suma importancia. Sobre las zonas altas del sistema de drenaje se dio el crecimiento en profundidad, longitud y ancho de cárcavas preexistentes. Sin embargo, las de mayor gravedad ocurrieron en la zona baja urbanizada dentro de las que se destacan las cárcavas frente al barrio Médanos sobre la av. Fray Luis Beltrán y la del camino a la “Caballeriza”. Los sedimentos erosionados atravesaron la totalidad de la cuenca por el cauce principal, pasaron por la pileta



de decantación de la calle Petrolero San Lorenzo y llegaron a la depresión donde se ubica la alcantarilla. En las zonas bajas de los sistemas de drenaje se producen esencialmente procesos de depositación. Esto sucedió en torno a la alcantarilla que se encontraba obstruida (**Fig. 11b**), en donde se depositaron sedimentos y el nivel de agua creció hasta superar el terraplén de la Ruta Nacional N°3. Los procesos fluviales mencionados serán abordados con mayor detalle en el subcapítulo 7.6. *Procesos Geodinámicos que afectan a la urbanización*.

7.3. Análisis morfométrico

El cálculo y análisis de los parámetros morfométricos permite caracterizar, predecir y comprender el comportamiento que tendrá la red hidrográfica frente a las precipitaciones (**Tabla 4**).

| Parámetro | Fórmula/Comando | Autor | Resultado |
|---|--|------------------|-------------------------------|
| Superficie de la cuenca (A) | Calcular geometría-ArcGis 10.5 | - | 13.38 km ² |
| Perímetro de la cuenca (P) | Calcular geometría-ArcGis 10.5 | - | 17.87 km |
| Diámetro mayor (D) | Medir-ArcGis 10.5 | - | 7.73 km |
| Diámetro menor (d) | Medir-ArcGis 10.5 | - | 2.5 km |
| Longitud del cauce principal (Lc) | Calcular geometría-ArcGis 10.5 | - | 6.43 km |
| Desnivel del cauce principal (Hp) | Identificar-ArcGis 10.5 | - | 82 m |
| Desnivel de la cuenca (Hc) | Resumen de estadísticas-ArcGis 10.5 | - | 360 m |
| Pendiente media de la cuenca | Resumen de estadísticas-ArcGis 10.5 | - | 11.85° |
| Pendiente media del cauce principal | Resumen de estadísticas-ArcGis 10.5 | - | 1.76° |
| Numero de cauces (N) | Resumen de estadísticas-ArcGis 10.5 | - | 511 |
| Longitud de la cuenca paralela al cauce principal (Lp) | Medir-ArcGis 10.5 | - | 5.98 km |
| Índice de Gravelius (Kc) | $Kc = P / C = 17.87 \text{ km} / 12.97 \text{ km}$ (C = Perímetro de un círculo de área igual al de la cuenca) | Gravelius (1914) | 1.38 |
| Índice de circularidad (Ic) | $Ic = A / Ac = 13.38 \text{ km}^2 / 25.34 \text{ km}^2$ (Ac = Área de un círculo del mismo perímetro que la cuenca) | Miller (1953) | 0.52 |
| Relación de elongación (Re) | $Re = 1,128 \times \sqrt{A} / Lp = 1.128 \times \sqrt{13.38 \text{ km}^2} / 5.98 \text{ km}$ | Schumm (1956) | 0.69 |
| Relación de relieve (Rr) | $Rr = Hc/Lp = 360 \text{ m} / 5.98 \text{ km}$ | Schumm (1956) | 60.2 |
| Densidad de Drenaje (Dd) | $Dd = Lt / A = 74.94 \text{ Km} / 13.38 \text{ km}^2$ | Horton (1932) | 5.6 km/km ² |
| Numero de rugosidad (Nr) | $Nr = Hc \times Dd = 0.36 \text{ Km} \times 5.6 \text{ km/km}^2$ | Strahler (1958) | 2.02 |
| Frecuencia Fluvial (Ff) | $Ff = N / A = 511 / 13.38 \text{ km}^2$ | Horton (1932) | 38.19 cauces/km ² |
| Infiltración Relativa (Ir) | $Ir = Dd \cdot Ff = 5.6 \text{ km/km}^2 \times 38.19 \text{ cauces/km}^2$ | | 213.86 cauces/km ³ |
| Flujo no encauzado (FNe) | $FNe = 1/(2 \cdot Dd) = 1/(2 \cdot 5.6 \text{ km/km}^2)$ | Horton (1945) | 0.089 |

Tabla 4. Parámetros morfométricos de la cuenca de Km. 3.



La cuenca de drenaje de Km. 3 presenta un área de 13.38 km², un perímetro de 17.87 km y un desnivel de 360 m. El diámetro mayor de ésta alcanza los 7.73 km, mientras que el menor, 2.5 km. Su cauce principal tiene una longitud de 6.43 km con un desnivel de 82 m. La pendiente media de la cuenca de drenaje es de 11.85°, mientras que la de su cauce principal, es de 1.76°. El número de cauces calculado es de 511.

Los índices que caracterizan la forma de la cuenca de drenaje dan como resultado una relación de elongación de 0.69, un índice de circularidad de 0.52 y un índice de Gravelius de 1.38. Los índices que se relacionan a la red de drenaje determinan una densidad de drenaje de 5.6 km/km², las mayores densidades se observan sobre la ladera norte del cerro Vitteau coincidiendo con los sectores de mayor pendiente, mayor heliofanía, exposición al viento y menor cobertura vegetal de la cuenca (**Fig.12**). En el caso del cerro Hermitte, los mayores valores se ubican sobre las arcilitas dislocadas del deslizamiento de “Sismográfica” e inmediatamente al este de este último. En el sector bajo de la cuenca, debido a la presencia de urbanización, la trama vial actúa como cauce elevando la densidad de drenaje en estos sitios. La frecuencia fluvial da un total de 38.19 cauces/km², el flujo no encauzado de 0.089, un número de rugosidad de 2.02 y una infiltración relativa de 213.86 cauces/km³. Respecto al índice que describe el relieve (relación de relieve) es de 60.2.

Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut.

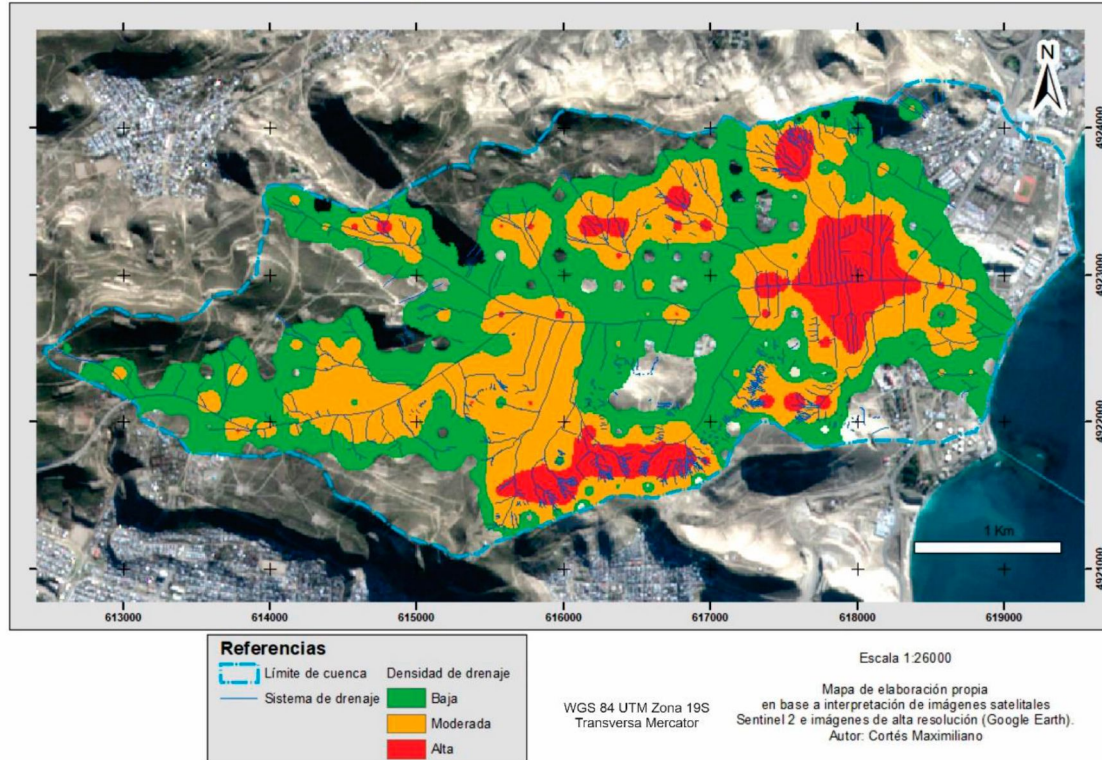


Figura 12. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Km. 3 (Ver en Anexo).

La relación de bifurcación de la cuenca da un promedio de 4.48. Sin embargo, ésta es notablemente alta en la relación entre los cauces de orden 4 y 5, en el que alcanza una relación de bifurcación de 6 (**Tabla 5**).

| <i>Cursos de</i> | <i>Orden</i> | <i>Orden</i> | <i>Orden</i> | <i>Orden</i> | <i>Orden</i> |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| N° de Cursos | 378 | 102 | 24 | 6 | 1 |
| Relación de bifurcación (Rb) | 3.71 | 4.25 | 4 | 6 | |
| Relación de bifurcación media (Rbm) | | | 4.48 | | |
| Longitud media (m) | 100.28 | 177.38 | 427.06 | 789.02 | 3170.7 |

Tabla 5. Número de cursos, Relación de bifurcación, Relación de bifurcación y longitud medias de cada orden de cauces, realizada con ARCGIS 10.4.

7.4. Evolución de la cuenca con relación a la urbanización

Con el paso de los años, el crecimiento de la población ocasiona un surgimiento de nuevas áreas urbanizadas y, por ende, se produce un cambio profundo en las características originales y en el uso de los suelos. Se modifican sus materiales y propiedades, la vegetación, la red de drenaje, su morfología y pendientes con el fin de mejorar las condiciones para las obras de infraestructura

(por ej. calles, avenidas), y la construcción de viviendas, comercios, industrias, actividad petrolera, entre otros.

Estos cambios se evidencian en la Figura 13 que representa el crecimiento de las superficies antropizadas desde 1970, donde ocupa solo 3.5 km², es decir, un 26.3% del área de la cuenca (**Fig. 13a**) en tanto que en el año 2021 el área antropizada alcanza los 5.2 km² (38.7%) (**Fig. 13b**), y si además se considera las modificaciones provocadas por la actividad petrolera, el área antropizada alcanza el 48% (**Fig. 13c**).

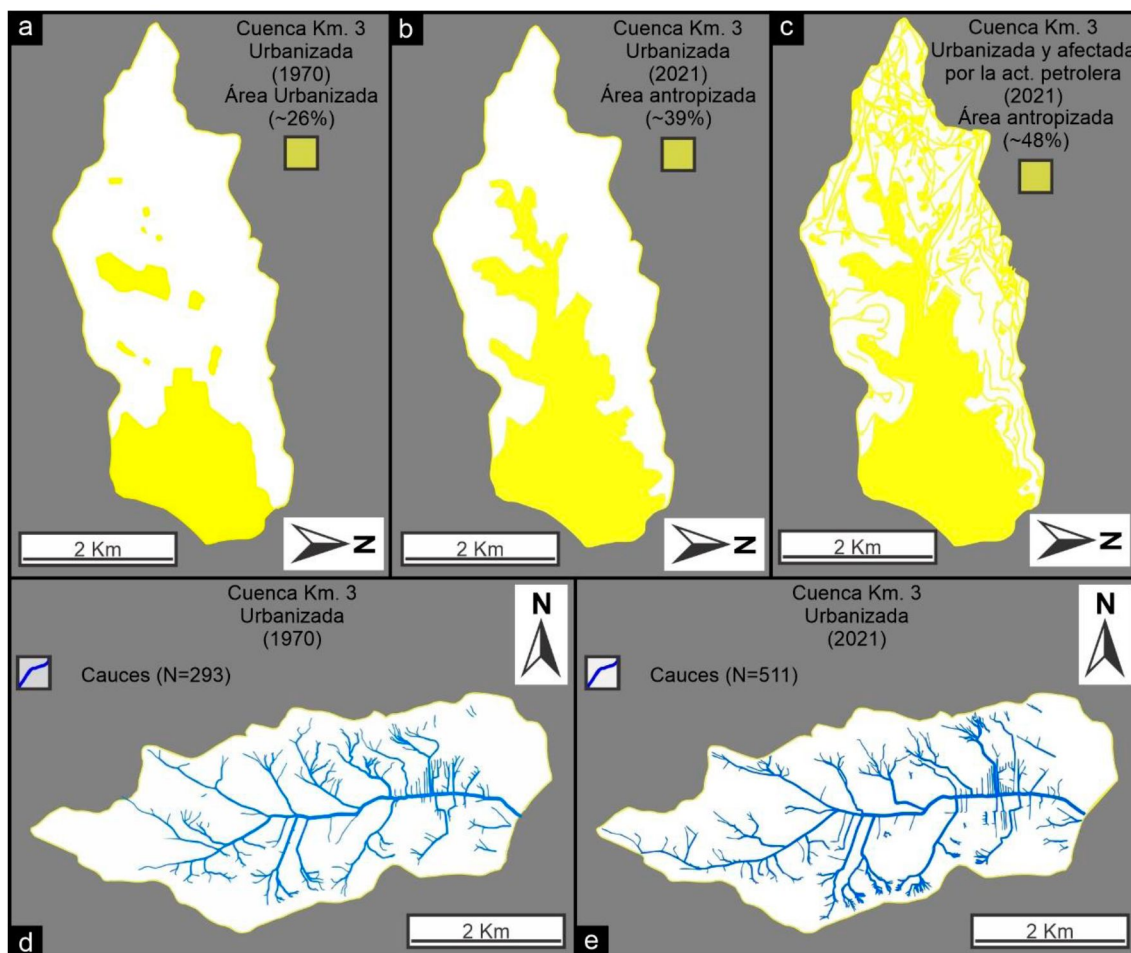


Figura 13. Comparación temporal de la cuenca de Km. 3. a) La urbanización en 1970 alcanzaba el 26% del área de la cuenca. b) La urbanización en 2021 alcanza el 39% del área de la cuenca. c) La urbanización junto a la actividad petrolera alcanza el 48% del área de la cuenca. d) El número de cauces era de 293, en 1970. e) El número de cauces es de 511 en 2021.

Este crecimiento junto a eventos de precipitaciones cada vez menos frecuentes y de mayor intensidad (Rabassa, 2010) tienen una consecuencia sobre los parámetros morfométricos como se observa en la Tabla 5. El número de cauces aumenta significativamente desde 293, en 1970 (**Fig. 13d**), a 511, en

2021 (**Fig. 13e**). También lo hace la densidad de drenaje, de 4.55 km/km² a 5.6 km/km² y la frecuencia fluvial (alcanzando 38.19 cauces/km²); la infiltración relativa alcanza el doble (213.86 cauces/km³) respecto a 1970; el flujo no encauzado disminuye hasta 0.089; la relación de bifurcación aumenta desde 3.94 a 4.48. Dicho de otro modo, al aumentar la cantidad de cauces también lo hace la densidad de drenaje, la frecuencia fluvial y la infiltración relativa. La alteración de la dinámica fluvial de la cuenca debido a la expansión urbana/industrial trae consecuencias contraproducentes sobre la misma urbanización si no se tienen en cuenta los procesos de transformación antrópica con las consecuentes respuestas en la dinámica natural que se dan en el terreno.

| Parámetro | Km. 3 (2021) | Km. 3 (1970) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Número de cauces | 511 | 293 |
| Densidad de drenaje | 5.6 km/km ² | 4.55 km/km ² |
| Frecuencia Fluvial | 38.19 cauces/km ² | 23.62 cauces/km ² |
| Infiltración Relativa | 213.86 cauces/km ³ | 107.47 cauces/km ³ |
| Flujo No Encauzado | 0.089 | 0.11 |
| Relación de Bifurcación | 4.48 | 3.94 |

Tabla 5. Comparación temporal de parámetro morfométricos de la cuenca de Km. 3 entre 1970 y 2019.

7.5. Estimaciones de Caudal

La falta de estaciones de aforo en la cuenca de drenaje de Km. 3 implica la necesidad implementar distintos métodos para estimar el caudal desarrollado producto de la excepcional lluvia de marzo/abril de 2017.

7.5.1. $Q=A*V$

Este método simple permite obtener un rápido valor de caudal. Apoyado en el material fotográfico y videográfico tomado en la calle Petrolero San Lorenzo se realizó la medición de la sección transversal que ocupó el flujo de agua el día 29 de marzo de 2017 a la hora 18:09 (**Fig. 14b**). La sección transversal calculada para este momento, apenas iniciada la tormenta, es de 4.9 m² (**Fig. 14c, d**). Se considera una altura de flujo de agua de aproximadamente 30 cm y un ancho máximo de 24 m (**Fig. 14d**).



Figura 14. a) Se observa la trayectoria del cauce principal y el cálculo de velocidad de flujo en distintos sectores a través del método del flotador (1, 2 y 3). b) Captura de video del flujo de agua sobre la calle Petrolero San Lorenzo el día 29/03/17 a la hora 18:09, apenas iniciada la tormenta. c) Calle Petrolero San Lorenzo antes de la tormenta. d) Sección transversal del flujo de agua del día 29/03/17 a la hora 18:09.

A partir del análisis de los videos tomados durante la tormenta, recopilados de redes sociales, se establece la velocidad del flujo de agua mediante el método del flotador en tres puntos del cauce principal, dos de ellos sobre la av. Fray Luis Beltrán, frente al barrio Médanos y el barrio Divina Providencia, y el restante en la av. Quintana. El resultado obtenido fue 4.6 m/s, 4.2 m/s y 5 m/s, respectivamente, con un promedio de 4.6 m/s (**Fig. 14a**).

30 cm de altura sobre la calle

$$Q = A * V = 4.9 \text{ m}^2 * 4.6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 22.54 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El caudal estimado con este método da como resultado 22.54 m³/s (29/03/17, 18:09). Este cálculo se realiza sobre la sección media del cauce principal (calle

Petrolero San Lorenzo, identificado en la Figura 14a) por lo que solo se contempla el caudal de agua drenada aguas arriba de dicho punto.

7.5.2. SCS CN

La tormenta evaluada acumuló 221 mm en 48 hs, y los cinco días previos a esta, un total de 13.4 mm, lo que corresponde a una condición de humedad antecedente de tipo II o normal para las estaciones otoño-invierno. Los grupos hidrológicos hallados dependen de las tasas de infiltración, y, por ende, están íntimamente relacionados a las diversas litologías que participan en el área de la cuenca, entre las que se encuentran depósitos finos arenolimosos, arenoarcillosos y arcillas (Hirtz et al., 2000a), por lo que su permeabilidad varía de moderada a baja. La Figura 15 muestra la distribución de los distintos grupos hidrológicos, predominando el de tipo C sobre los taludes y valle fluvial, respecto a los restantes, B y D, ubicados en terrazas estructurales y deslizamientos, respectivamente.

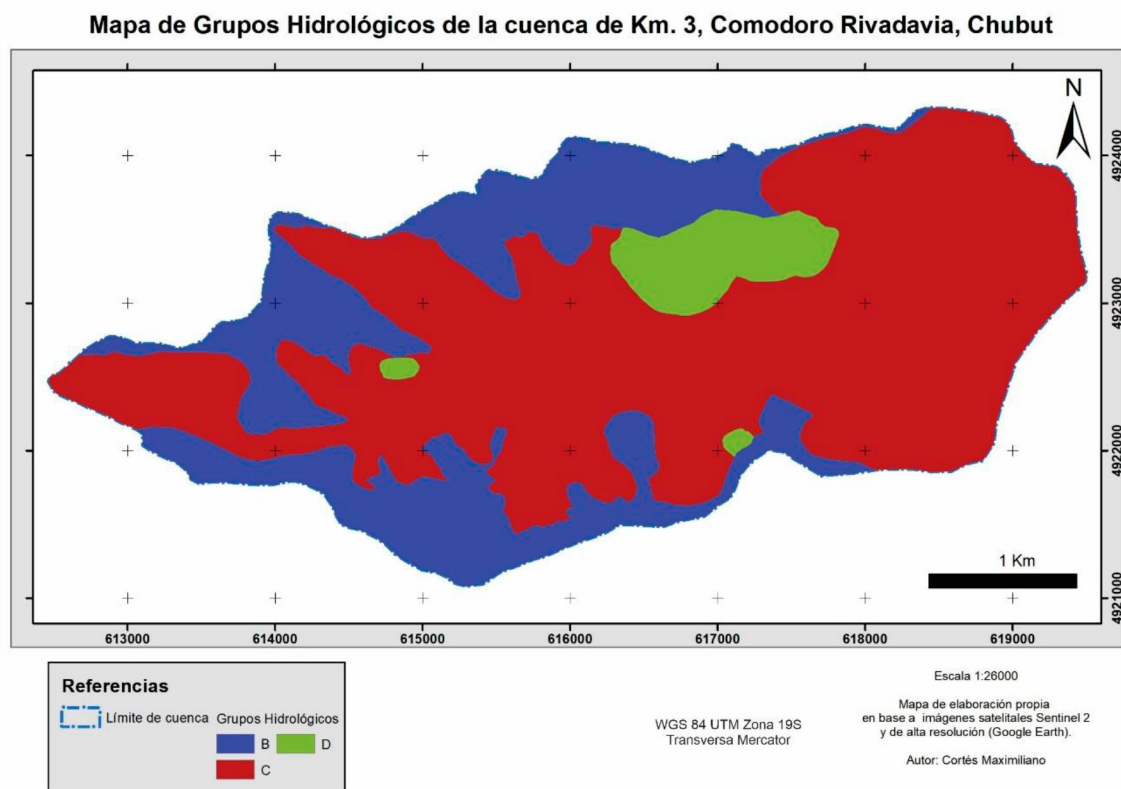


Figura 15. Mapa de grupos hidrológicos de la cuenca de Km. 3 (Ver en Anexo).

La Figura 16 detalla los distintos usos de suelos, entre los que se encuentran áreas pavimentadas, calles de tierra, caminos petroleros, cobertura vegetal (alta, moderada y baja), locaciones petroleras, zona comercial, de

desarrollo, industrial, ocio y residencial. Combinando la condición de humedad antecedente, los GH y los usos de suelos se definen los CN basados en la Tabla 3.

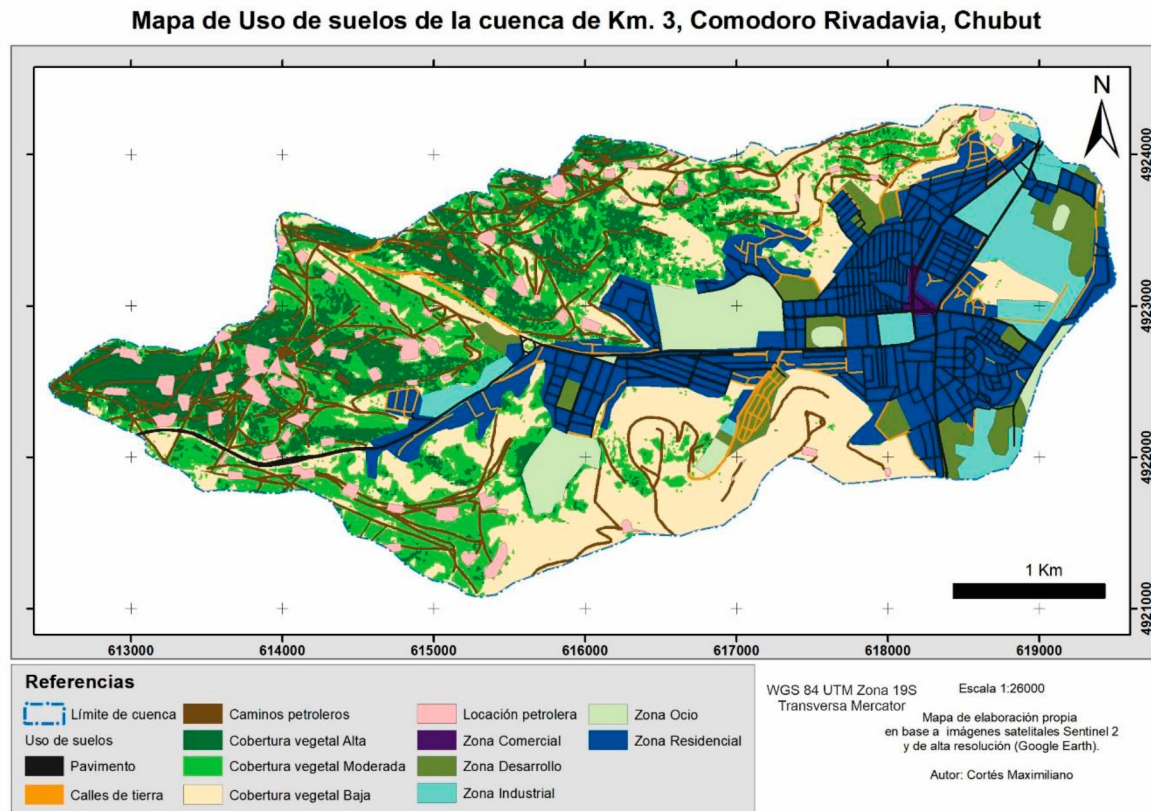


Figura 16. Mapa de uso de suelos de la cuenca de Km. 3 (Ver en Anexo).

Los CN de la cuenca varían entre 79.92 y 89.68 (**Fig. 17**). Estos altos valores, cercanos a 100, corresponden a suelos de baja infiltración y alta escorrentía superficial. La media ponderada calculada para la cuenca de Km. 3 da como resultado un valor de CN igual a 82.99.

$$CN = \sum \frac{A * CN}{At} = 82.99$$

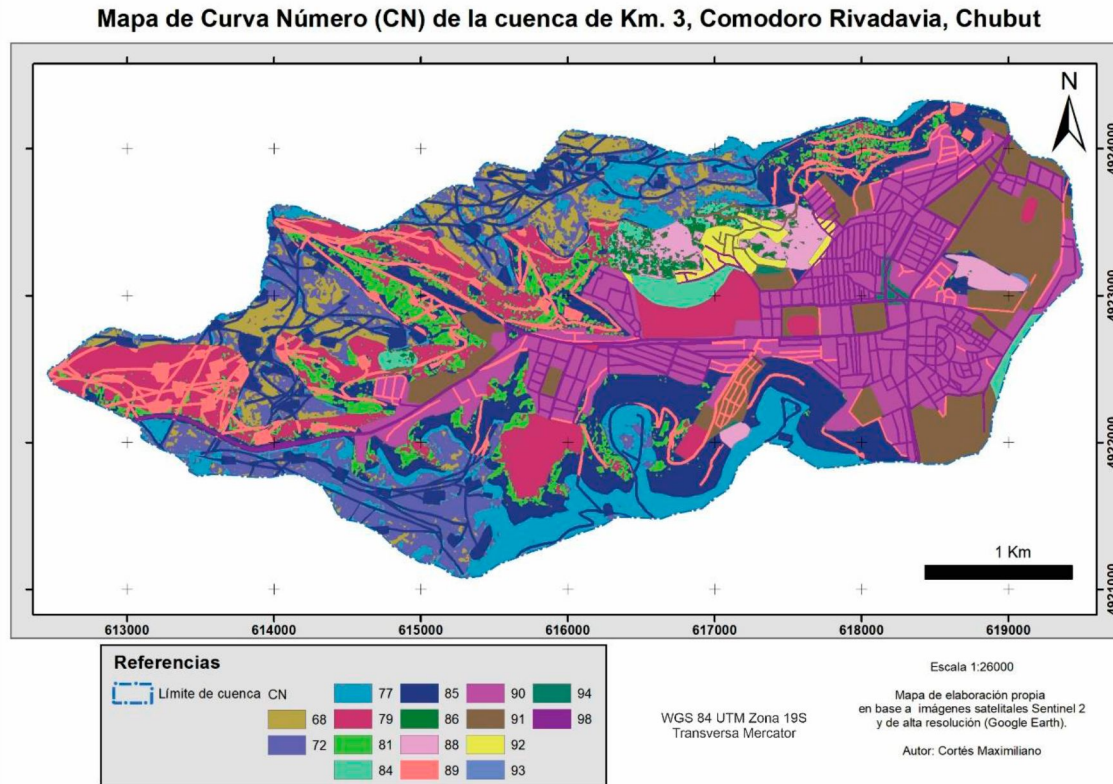


Figura 17. Mapa de distribución de Curva Número (CN) (Ver en Anexo).

A partir de este valor se procede a realizar los cálculos para obtener el caudal mediante el método SCS CN, utilizando el tiempo de concentración de 23.22 minutos, calculado en Paredes et al. (2017) mediante la ecuación de Kirpich (Kirpich, 1940). El resultado obtenido es 25.21 m³/s (valor que llega a la alcantarilla de Ruta Nacional N°3).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 = \frac{25400}{82.99} - 254 = 52.06$$

$$Ia = 0.2 * S = 0.2 * 52.06 = 10.412$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} = \frac{(221 - 10.412)^2}{221 + 0.8 * 52.06} = 168.85 \text{ mm}$$

$$Tp = \frac{tc + 0.133tc}{1.7} = \frac{23.22 + 0.133 * 23.22}{1.7} = 15.48 \text{ hs}$$

$$Qp = \frac{0.208 * A * Q}{Tp} = \frac{0.208 * 11.11 \text{ m}^2 * 168.85 \text{ mm}}{15.48 \text{ hs}} = 25.21 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.5.3. HEC HMS

El software HEC HMS 4.5 permite realizar un cálculo más preciso que el antes mencionado (SCS CN) debido a la posibilidad de trabajar con un mayor número de variables. Sin embargo, los métodos de pérdida y transformación corresponden a los de SCS CN y SCS hidrograma unitario, respectivamente, por lo que comparten parte de la misma información.

La cuenca de Km. 3 es limitada hasta la Ruta Nacional N°3 (no contempla el caudal desarrollado al Este de la Ruta Nacional N°3) y se subdivide en ocho subcuencas. El programa HEC HMS permite realizar un esquema de la cuenca en el que se señalan todas las subcuencas que participan en la evaluación y sus conexiones mediante elementos denominados conjunciones (unen dos subcuencas). A su vez, estos últimos se conectan entre sí hasta la descarga (**Fig. 18**). Cada uno de estos elementos son caracterizados con distintos parámetros que intervienen en el cálculo de caudal y definen las propiedades del modelo de cuenca.

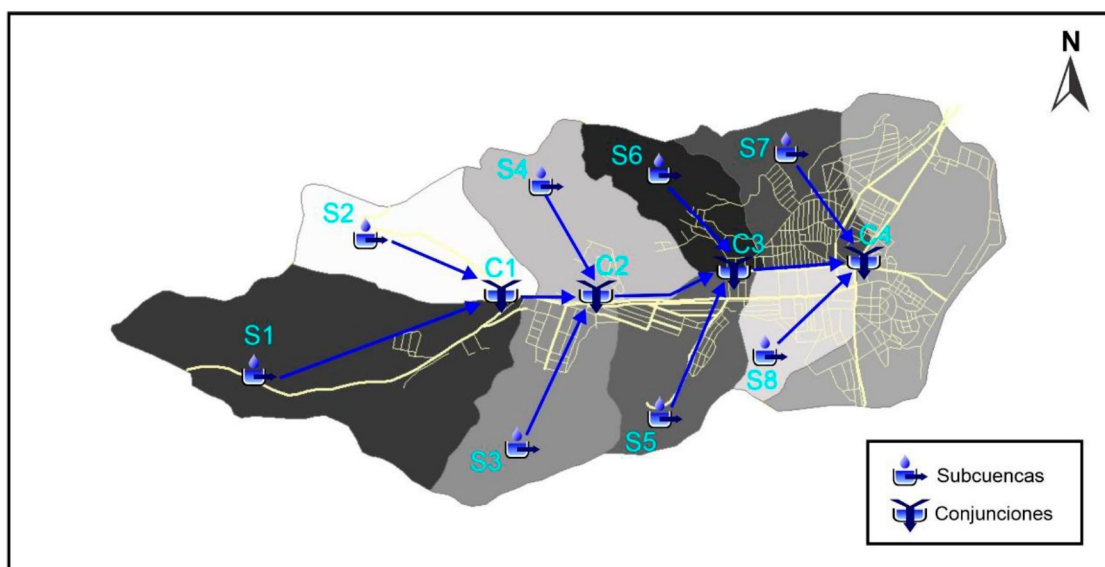


Figura 18. Esquema de la cuenca de Km. 3, donde se observan como se conectan las subcuencas, conjunciones y tramos, para el cálculo de caudal en el software HEC-HMS 4.5.

Las características de las subcuencas dependen del área que ocupan, valor de CN, porcentaje de impermeabilidad y tiempo de retardo o lag (**Tabla 6**). El tiempo de retardo se considera como el 60% del tiempo de concentración, según la SCS. Este último se obtiene mediante el cálculo del tiempo de concentración (t_c) aplicando la ecuación de Kirpich (1940).

$$t_c = 0.00013 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Puede observarse que los valores de Curva Número varían entre 74 y 88, ubicando los más altos hacia el este acompañado por la mayor densidad de suelos urbanizados. Del mismo modo lo hacen los tiempos de retardo, aunque las diferencias sean leves.

| <i>Subcuencas</i> | <i>Área</i> | <i>% Impermeable</i> | <i>CN</i> | <i>Tiempo de retardo</i> |
|-------------------|-------------|----------------------|-----------|--------------------------|
| S1 | 3.02 | 12.25 | 80.82 | 8.748 |
| S2 | 1.26 | 5.55 | 79.92 | 5.443 |
| S3 | 1.44 | 32.64 | 82.27 | 6.804 |
| S4 | 1.48 | 25.68 | 81.2 | 4.899 |
| S5 | 1.14 | 43.86 | 85.83 | 5.725 |
| S6 | 0.87 | 35.63 | 82.75 | 5.394 |
| S7 | 0.79 | 69.62 | 89.68 | 4.41 |
| S8 | 1.11 | 53.15 | 88.18 | 5.004 |

Tabla 6. *Contiene área, porcentaje de área impermeable, CN y tiempo lag de cada subcuenca.*

El modelo meteorológico depende exclusivamente del registro del pluviógrafo de la empresa Termap por lo que todas las subcuencas se ven afectadas por los mismos valores de lluvia. La precipitación utilizada acumula un total de 221 mm entre el día 29 al 31 de marzo de 2017 con intervalos de 10 minutos. Esta comienza levemente durante un corto lapso de la madrugada del 29 de marzo y cesa. Durante la tarde del mismo día vuelve a llover hasta la tarde – noche del 31 de marzo de 2017 (primera lluvia) alcanzando un máximo de 4.83 mm en 10 minutos (**Fig. 19**).

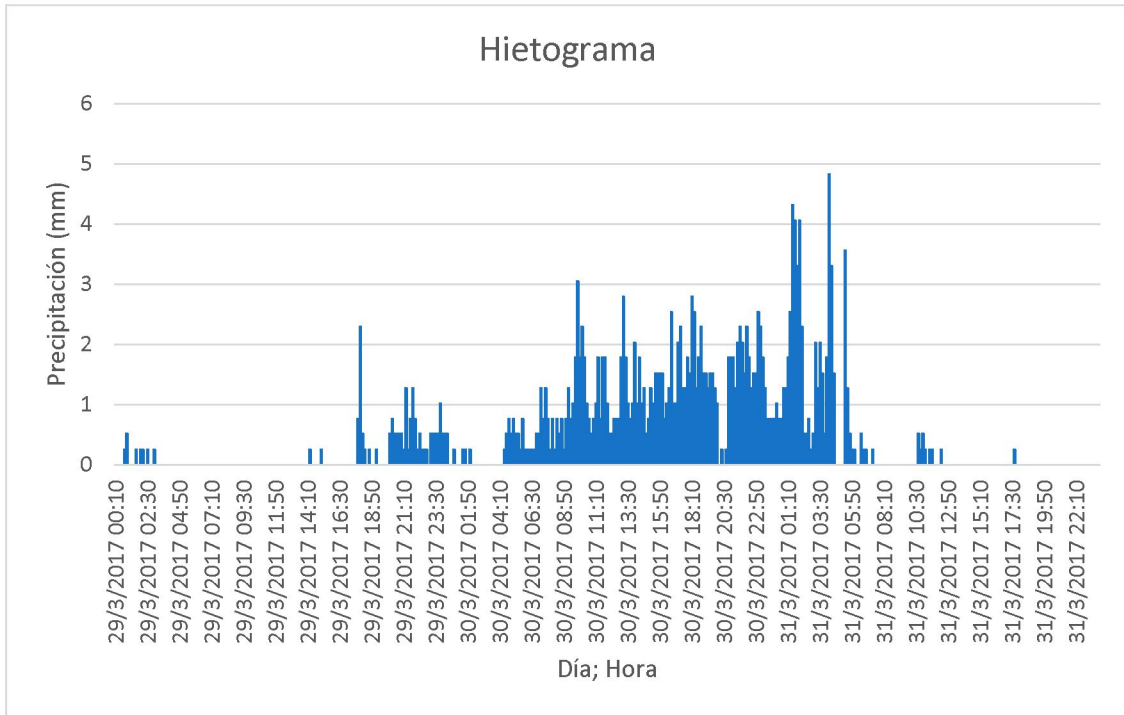


Figura 19. Hietograma de la primera tormenta, del día 29 al 31 de marzo de 2017. Registro del pluviógrafo de la empresa Termap.

El resultado simulado por el software HEC-HMS 4.5 describe un caudal máximo de $41.9 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 5:22 am del día 31 de marzo de 2017 (**Fig. 20**).

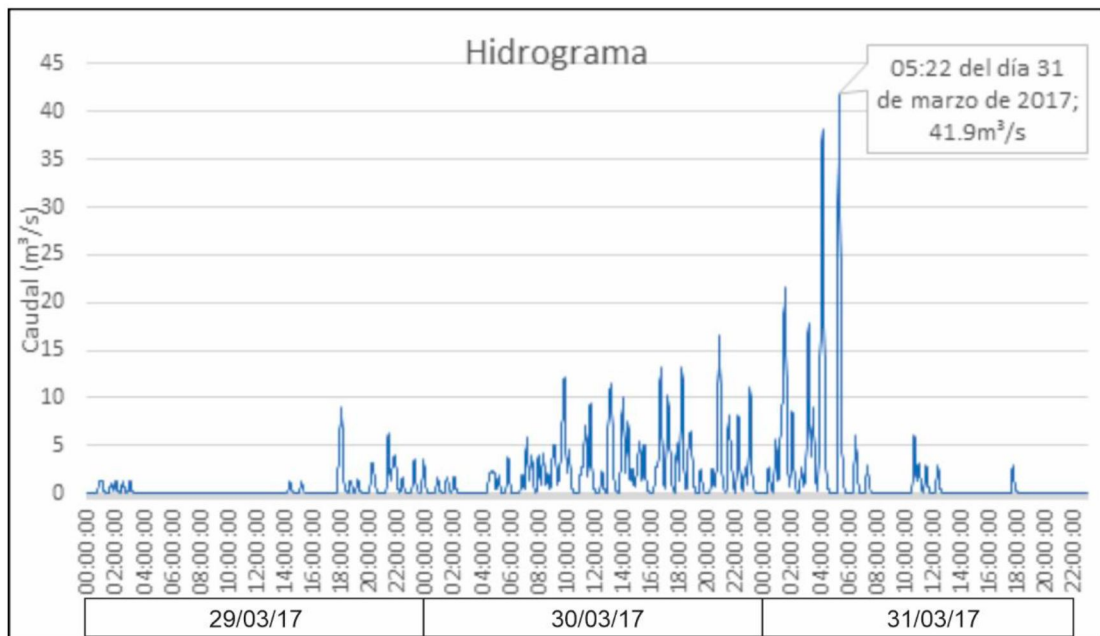


Figura 20. Hidrograma calculado por HEC-HMS 4.5 de la primera tormenta. Se observa un caudal pico de $41.9 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 5:22 am del día 31 de marzo de 2017.



7.6. Procesos geodinámicos que afectan a la urbanización.

7.6.1. Erosión hídrica: Cárcavas

El cambio de uso de suelos debido a la actividad petrolera y el loteo para viviendas son dos de los factores más importantes para la generación de cárcavas en el área de la cuenca Km. 3. Estas actividades implican el movimiento del terreno para nivelar la superficie sobre los faldeos o debajo de los mismos, eliminación de la cobertura vegetal, aumento de pendientes de los taludes de plataformas y caminos de acceso.

La Figura 21 muestra la evolución de un sector de la cuenca, desde 1970 (**Fig. 21a**), donde el cambio de uso de suelos todavía no había ocurrido, al 2017, en el que la ocupación del espacio por la actividad petrolera generó grandes plataformas y caminos de acceso, (**Fig. 21f**) que luego fueron afectadas por la aparición de cárcavas (**Fig. 21b**) de gran tamaño en cercanías de un loteo de viviendas (**Fig. 21d**). Como resultado de la tormenta de 2017, se nota un aumento en el largo, entre 13 a 22 m, y su ancho, entre 2 a 5 m (**Fig. 21c**). El mismo proceso se observa sobre uno de los taludes del mencionado loteo, donde se dan nuevamente condiciones que favorecen la erosión, como el movimiento de suelos, el cambio de pendiente del lugar y la desprotección por la remoción de la vegetación. Allí el carcavamiento logra cortar una de las calles próximas al talud (**Fig. 21e**).

Es común que sobre los taludes de las plataformas o los bordes de caminos ubicados en las laderas de los cerros se desarrolle un sistema de cárcavas paralelas en dirección de la máxima pendiente. Estas inician en el borde superior del talud, en el que se evidencia un mayor volumen de material removilizado, y crecen en longitud hacia abajo (**Fig. 21c**).

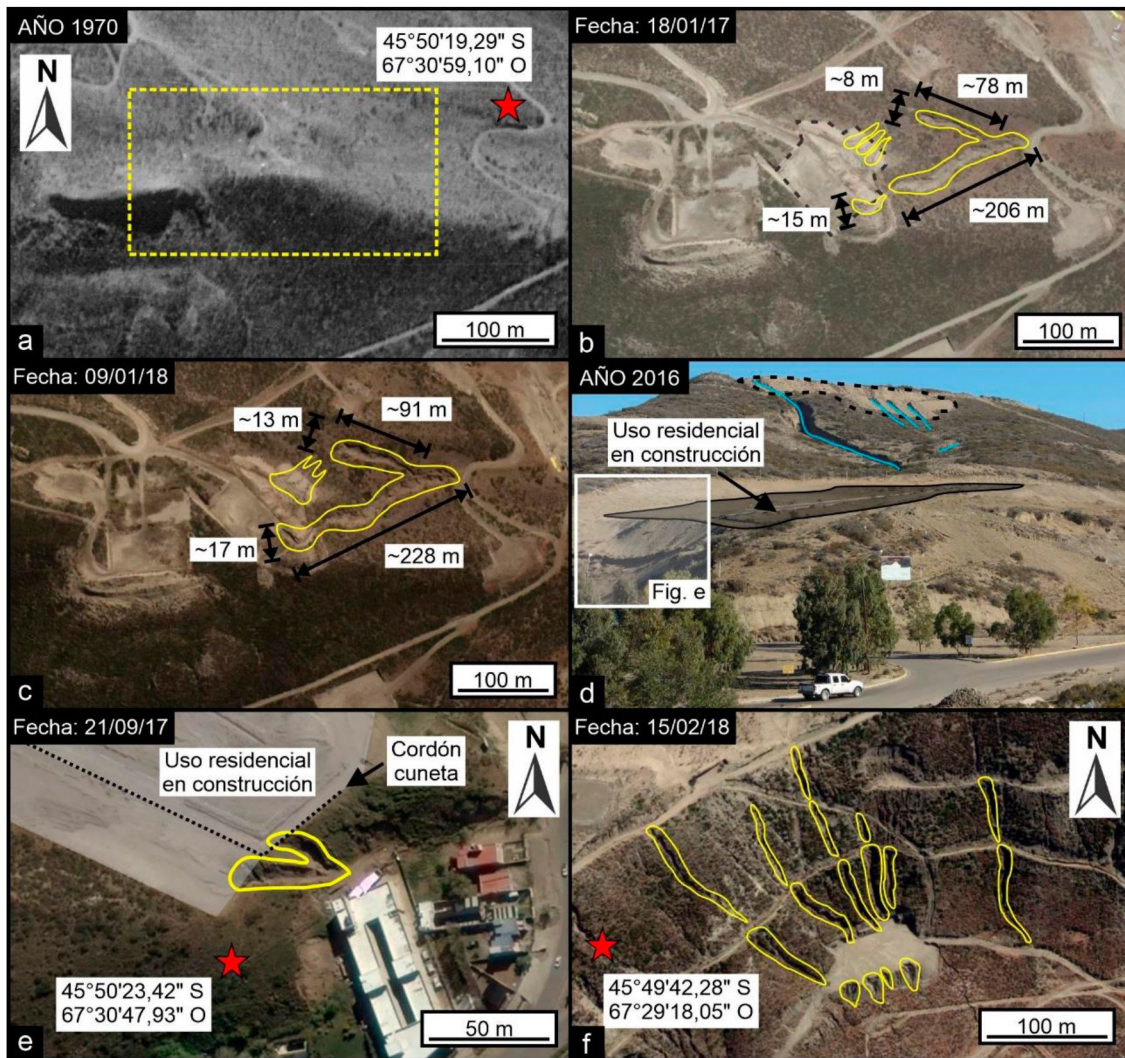


Figura 21. Ejemplo de desarrollo de cárcavas asociadas al cambio de uso de suelos. a) Sector del área de estudio previo a ser antropizado. Fotografía aérea vertical de 1970 (IGM). b) Imagen satelital de Google Earth™ del 18/01/17 (antes de la tormenta) donde se observa una locación petrolera con el desarrollo de varias cárcavas alrededor de esta. c) Imagen satelital de Google Earth™ posterior a la tormenta. Se observa el crecimiento en largo y ancho de las cárcavas. d) Fotografía del año 2016 donde se observa la magnitud de las cárcavas antes mencionadas y su cercanía a un loteo de viviendas. e) imagen satelital de Google Earth™ del loteo después de la tormenta de 2017. Se observa cárcavamiento sobre uno de los faldeos. Sus cabeceras cortan casi por completo una de las calles. f) Desarrollo de cárcavas influenciadas por la presencia de caminos y plataformas.

Según lo recopilado por la aplicación del LabSIG en la tormenta de 2017, el mapa de daños demuestra que la mayor cantidad de denuncias relacionadas a cárcavas en la cuenca de Km. 3 (**Fig. 22**) se sitúan en la zona baja de ésta sobre el cauce principal y en cercanías de los afluentes de mayor orden, que en

general, son de gran tamaño; otras, de pequeñas dimensiones, se presentan más aisladas en calles sin asfaltar donde existe una variación de relieve.

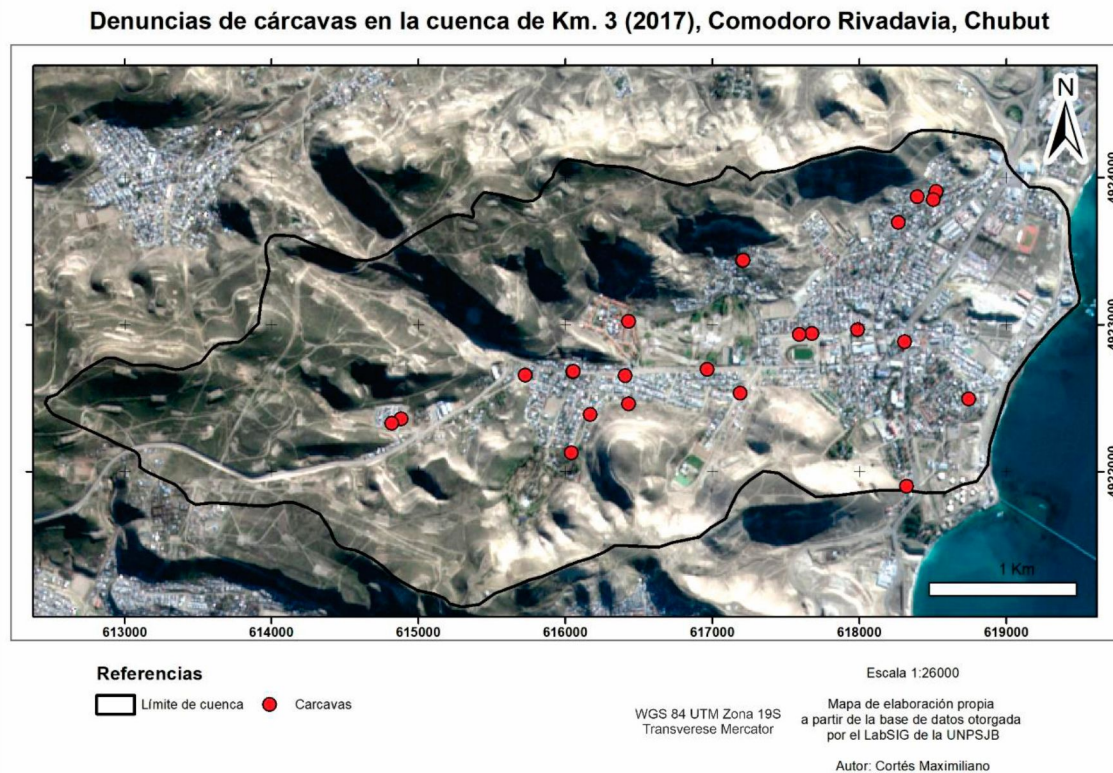


Figura 22. Mapa con la ubicación de denuncias por desarrollo de cárcavas. Datos aportados por el LabSIG de la UNPSJB (Ver en Anexo).

Las cárcavas de mayor importancia se desarrollaron sobre el camino de la “Caballeriza”, la avenida Fray Luis Beltrán, el camino que une los barrios Laprida y Saavedra, Barrio Extensión Saavedra, y otra no tan pronunciada en cuanto a sus dimensiones, sobre la calle Petrolero San Lorenzo. Todas ellas surgen debido a las lluvias de marzo/abril y son la causa de los mayores inconvenientes sobre el tránsito y los servicios públicos, como agua, cloacas y electricidad. Otras cárcavas de gran magnitud, preexistentes a la tormenta, se ubican detrás del barrio Médanos y del colegio Deán Funes las cuales solo sufrieron cambios en sus dimensiones.

La primera cárcava ($45^{\circ}50'22.82''S$ $67^{\circ}29'24.68''O$) es una de las principales calles de ingreso al Barrio Divina Providencia, (accediendo en forma diagonal desde la avenida Fray Luis Beltrán). Se encuentra sobre una pendiente que varía de 0° a 10° con una media de 4.35° (**Fig. 23a**) cubierta de material granular con una importante componente de granulometrías tamaño grava y



arena, por la que pasa un cauce de 4° orden, y recibe el flujo de agua de un área de 1.14 km², aproximadamente. Esta cárcava alcanza los 360 m de longitud, 8 m de ancho (**Fig. 23b**) y una profundidad de aproximadamente 7 m (**Fig. 23c**). Sus paredes laterales son abruptas, lo que define una sección transversal rectangular, que en algunos sectores se ven afectadas por grietas de tensión. El material erosionado se conforma principalmente de sedimentos modernos coluviales y aluviales finos (arenas, limos y arcillas) y también se los encuentra en forma de bloques producto del colapso de las paredes de la cárcava. La trayectoria de erosión coincide con la de los conductos cloacales subterráneos, que siguen la traza de la referida calle. La profundidad de incisión fue mayor a la ubicación del sistema de cañerías, ya que parte de ellos, al desconectarse, se los encontró en una posición más baja en la vertical en comparación a los que no fueron afectados por la erosión. En la Figura 23d se muestra que, en el año 1970, ya existía la presencia de una cárcava de aproximadamente 130 m de longitud y 11 m de ancho a pocos metros del camino a la “Caballeriza” que, con posteridad, fue rellenada con el avance de la urbanización. Actualmente se la encuentra rellena sin ningún cambio visible en comparación con el estado previo a la tormenta.



Figura 23. Se observa la cárcava generada por el temporal del 2017 sobre el camino a la “Caballeriza”. a) Imagen satelital de Google Earth™ antes del temporal (18/01/17). b) Imagen satelital de Google Earth™ posterior al temporal (13/07/17). c) Fotografía de la cárcava donde puede observarse la profundidad de la incisión vertical debido a la erosión hídrica. d) Fotografía aérea vertical del año 1970 (IGM) donde se observa una cárcava a pocos metros del camino a la “Caballeriza”.

La avenida Fray Luis Beltrán permite el ingreso al Barrio Divina Providencia, Saavedra y al camino Roque González (**Fig. 24a**). Es considerada una vía de importancia dentro del conjunto de barrios de Km. 3. Ésta conforma la sección media del cauce principal de 5° orden de la cuenca y posee una inclinación que llega a un máximo de 10°. La cárcava logró una extensión de 510 m de largo, 25 m de ancho (**Fig. 24b**) y una profundidad aproximada de 6 m (**Fig. 24c**). Sus paredes se presentan de manera subvertical y configuran una sección



transversal rectangular. El material erosionado y transportado corresponde a sedimentos modernos coluviales y aluviales compuestos por granulometrías que corresponden a arenas finas. A diferencia de la cárcava del camino a la “Caballeriza”, se observa una importante cantidad de clastos tamaño grava que provienen en gran parte del material granular utilizado para las capas estructurales que dan sostén a la carpeta asfáltica. El lecho de la cárcava se encuentra tapizado por fragmentos de pavimento y bloques de los sedimentos erosionados que se forman producto de su desplome por existencia de grietas de tensión paralelas a sus paredes (**Fig. 24c**).

En este sector de la cuenca, los flujos de agua provenientes de los canales de hormigón del camino Roque González, del camino “Saavedra – Laprida” y del Parque Saavedra (av. del Pinar) se concentraron en la av. Fray Luis Beltrán (área de aporte de agua de aproximadamente 5.7 km²), frente a la entrada del barrio Médanos (**Fig. 24a**), y debido a la gran velocidad que adquirió por el tránsito sobre superficies de baja rugosidad (asfalto/hormigón) erosionó parte de las banquetas de tierra que rodean la avenida, lo que generó socavamiento y posterior hundimiento de la calzada. Los ductos cloacales y pluviales soterrados también se vieron afectados. No se descarta que por el desbordamiento de las cañerías se hayan producido filtraciones que generaron erosión de manera subterránea, exacerbando aún más la situación.

Cabe destacar que antiguamente se encontraba una cárcava de dimensiones similares ubicada sobre el mismo lugar que la “nueva cárcava” (**Fig. 24d**) que fue enterrada para ser una vía principal de acceso. Lo mismo sucedió con la antigua cárcava de la calle Petrolero San Lorenzo (**Fig. 25c**), sector inferior del cauce principal (**Fig. 25a**). En este caso, la cárcava deterioró el pavimento y profundizó cerca de 60 cm (**Fig. 25d**). La extensión desarrollada en 2017 es 100 m menor y un ancho de casi la mitad en comparación con la de 1970 (**Fig. 25b, c**). Ambas cárcavas, actualmente, se encuentran rellenas. La de la av. Fray Luis Beltrán recientemente fue rellena y asfaltada, mientras que la de la calle Petrolero San Lorenzo, solo fue rellena y cubierta por material granular gravoso, a diferencia del estado en que se encontraba en 2017, donde ésta presentaba una carpeta asfáltica.

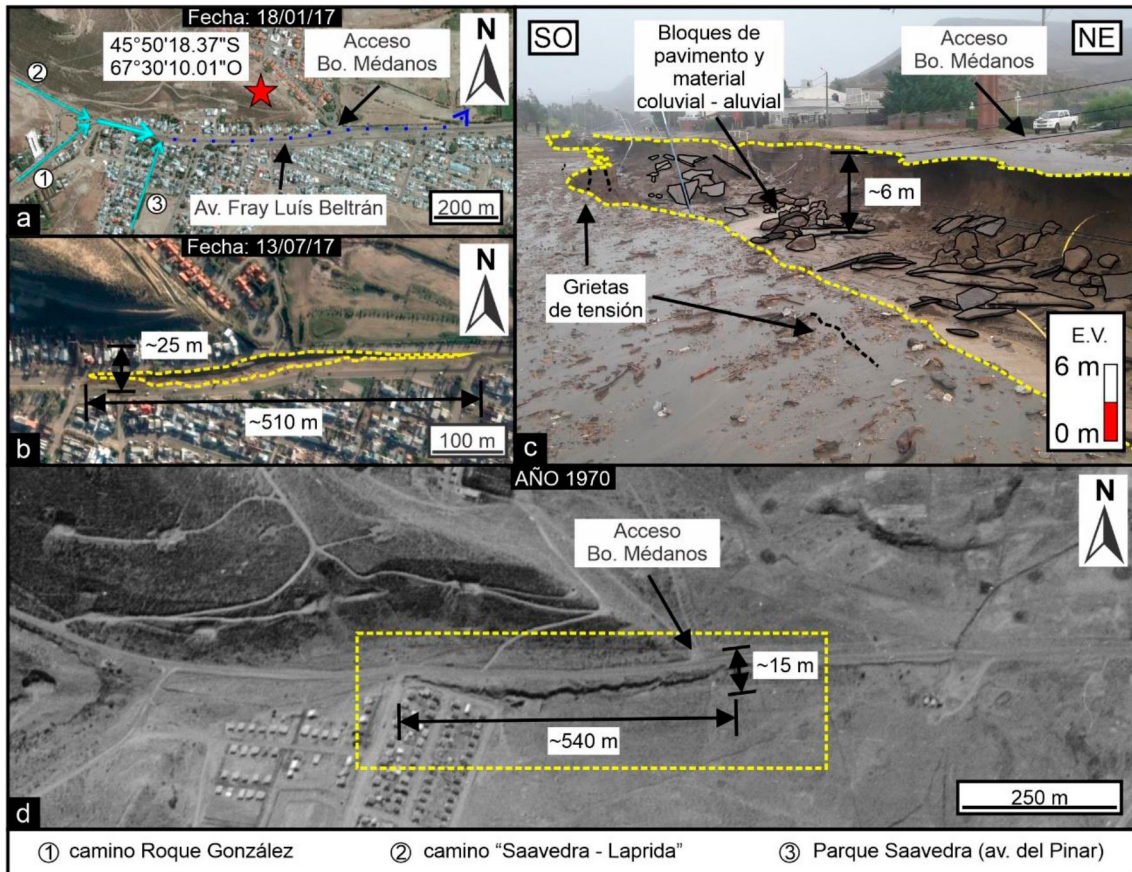


Figura 24. Cárcava desarrollada frente al barrio Médanos. a) Imagen satelital de Google Earth™ previo al temporal de 2017 (18/01/17). Se indica con flechas las vertientes que confluyen en la av. Fray Luis Beltrán b) Imagen satelital de Google Earth™ después del temporal de 2017 (13/07/17). Se delimita la extensión de la cárcava. c) Fotografía aérea vertical del año 1970 (IGM). Se observa una cárcava de dimensiones similares a la producida por el temporal de 2017.

El camino que comunica, por el coronamiento del cerro Hermitte (**Fig. 26a**), los barrios de Saavedra y Laprida, también desarrolló durante el temporal una cárcava profunda afectando parte de la traza vial. La cárcava se caracteriza por una pendiente promedio de 14.83° pudiendo alcanzar en algunos sectores los 27° . Posee una longitud de 1050 m, un ancho máximo de 8 m (**Fig. 26b**) y una profundidad aproximada de 4 m (**Fig. 26c**). La erosión se da sobre sedimentos de origen coluvial y aluvial, como en la mayoría de los casos mencionados anteriormente, material de relleno superficial de la traza vial (principalmente gravas y arena) y *ostreas*. La cárcava capta el flujo de agua de aproximadamente 1.26 km^2 y lo dirige sobre la trayectoria del camino.

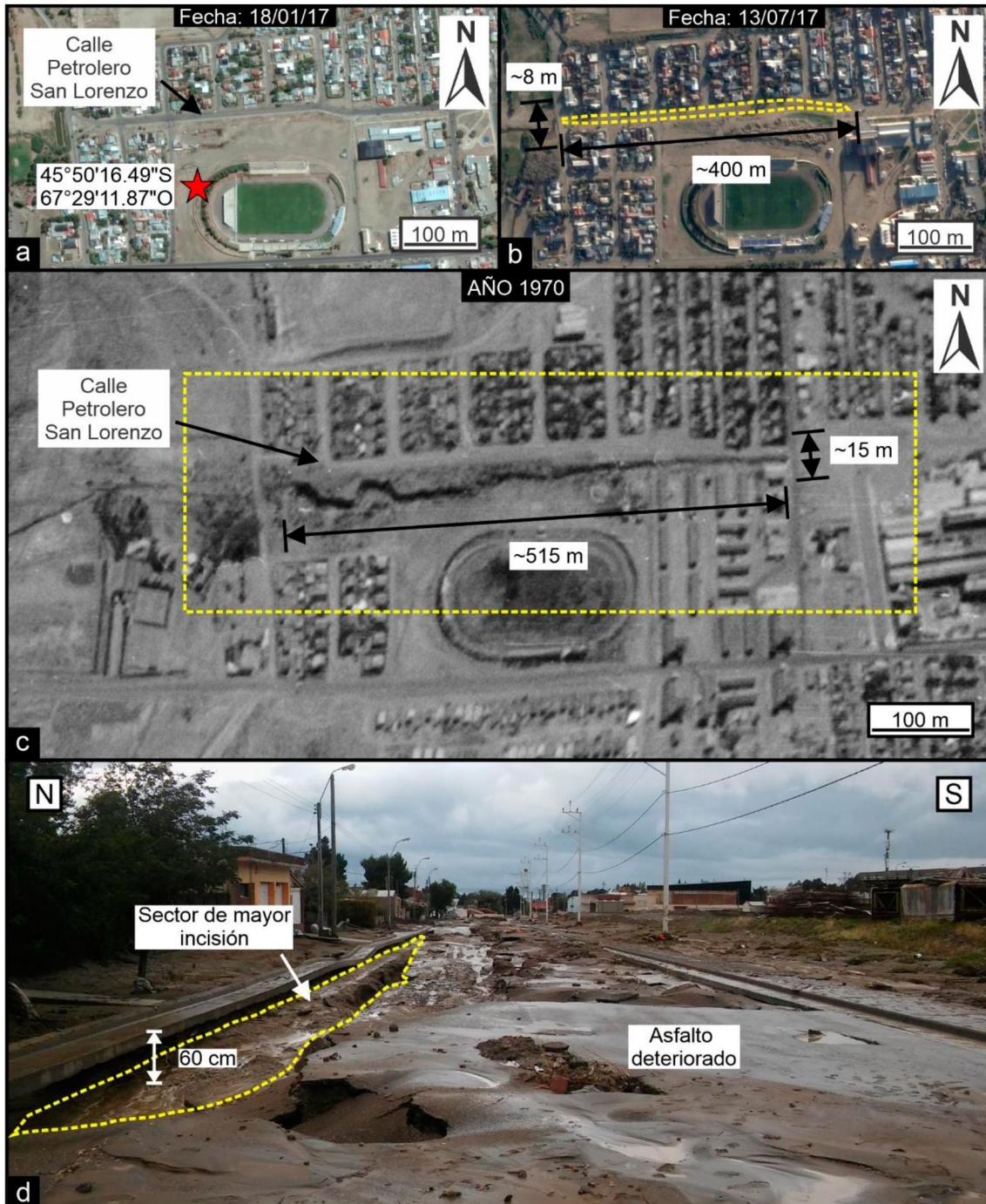


Figura 25. Erosión hídrica sobre la calle Petrolero San Lorenzo. a) Imagen satelital de Google Earth™ previo al temporal de 2017 (18/01/17). b) Imagen satelital de Google Earth™ posterior al temporal (13/07/17). c) Fotografía aérea vertical del año 1970 (IGM). Se observa la presencia de una cárcava ubicada a un lado de la calle Petrolero San Lorenzo. d) Profundidad de incisión de 60 cm sobre el lado izquierdo de la calle Petrolero San Lorenzo.

En el Barrio Extensión de Saavedra (**Fig. 26d**), hasta antes de la tormenta, solo existían algunas cárcavas pequeñas sobre la ladera del cerro especialmente vinculadas a caminos y locaciones petroleras. Luego de esta, las cárcavas

crecieron en extensión, ancho y profundidad, en cercanía de las viviendas. La más extensa de ellas se ubica hacia el norte (**Fig. 26e**), tiene un largo de 650 m y 6 m de ancho, mientras que la más corta presenta 210 m de extensión y 6 m de ancho, como máximo. Ambas se presentan sobre laderas con pendientes que varían entre los 24° y 0°. El material que se erosiona se compone de sedimentos coluviales y aluviales modernos. El área de aporte de agua que alimenta las cárcavas alcanza los 0.15 km².

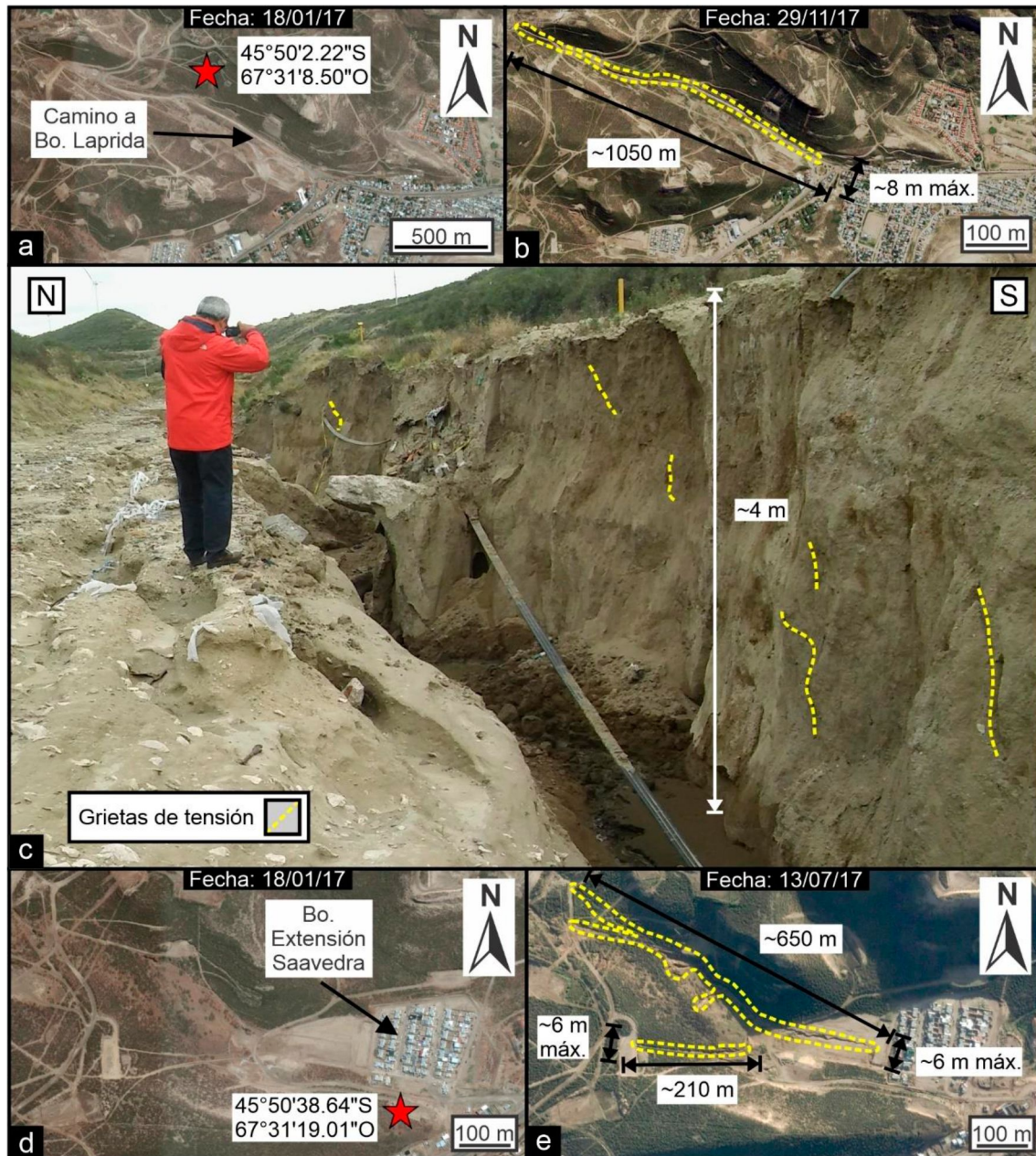


Figura 26. Desarrollo de cárcavas antes y después del temporal de 2017. a) Imagen satelital de Google Earth™ del camino al barrio Laprida antes del temporal (18/01/17). b) Imagen satelital de Google Earth™ del camino al barrio Laprida después del temporal (29/11/17). c) Fotografía de la cárcava



donde se observa una profundidad de aproximadamente 4 m de incisión. d) Imagen satelital de Google Earth™ del barrio Extensión de Saavedra antes del temporal (18/01/17). e) Imagen satelital de Google Earth™ del barrio Extensión de Saavedra después del temporal (13/07/17).

Las cárcavas se ubican sobre la ladera del cerro Vitteau ($45^{\circ}50'37.78''S$ $67^{\circ}28'57.73''O$), detrás del colegio Deán Funes, se formaron previamente al temporal. En general, sus largos varían entre 120 m a 150 m, los anchos de escasos centímetros a 5 m (**Fig. 27a**). Producto de la tormenta, las que se encuentran al norte, aumentan su longitud unos 15 a 20 m y el ancho entre 2 a 4 m. La que se halla hacia el sur no varía demasiado en el ancho, pero si lo hace en longitud. Logra alcanzar 400 m de extensión. Su alargamiento se da mayormente en la zona baja (erosiona parte de una calle) y muy poco en su cabecera (**Fig. 27b**). La erosión ocurre predominantemente sobre sedimentos modernos coluviales y aluviales, y en menor medida sobre los de la Fm. Chenque (en cabeceras de las cárcavas). Detrás del barrio Médanos, se ubica una importante cárcava desarrollada con anterioridad al año 2017 (**Fig. 27c**) en la que no se observan cambios en su longitud, pero si en el ancho sobre todo en la base (aumenta 5 m), cuando se reduce la pendiente (**Fig. 27d**). En la Figura 27e, se observa sobre las pendientes elevadas que la sección transversal es en “V”. Cuando se reduce la inclinación, el perfil cambia a rectangular y se caracteriza por paredes subverticales con grietas de tensión (**Fig. 27e**). En las zonas altas, el lecho de la cárcava presenta grandes bloques de coquinas y de cobertura moderna, y también de rocas de la Fm. Chenque. En las zonas bajas, próximas al barrio Médanos, se notan en las laterales acumulaciones de sedimentos coluviales y aluviales en forma de bloques y disgregados, recubiertos de forma saltuaria por vegetación, y por el centro del fondo de la cárcava se reconoce sectores que presentan mayor actividad durante lluvias de menor intensidad.

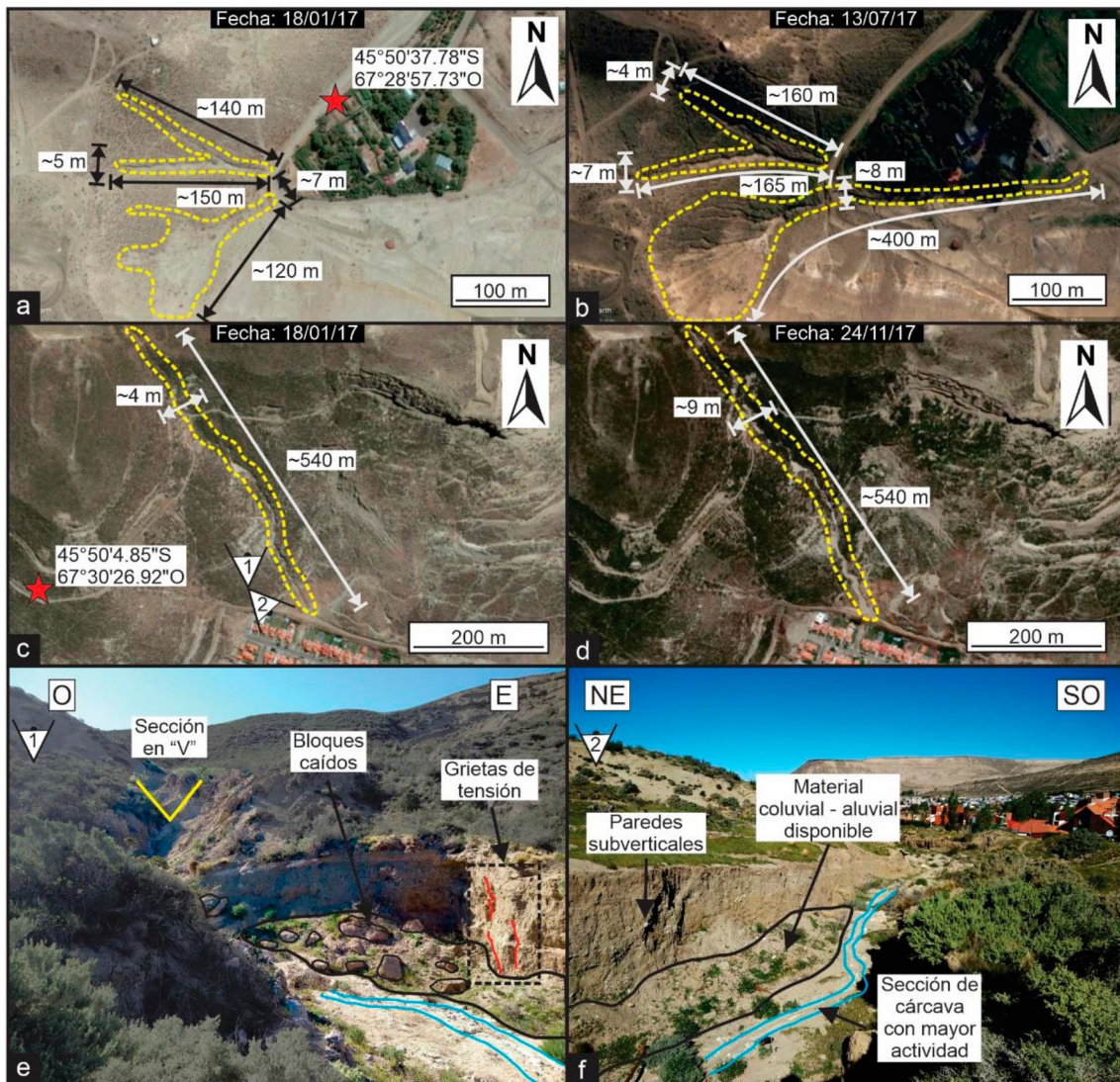


Figura 27. Cárcavas preexistentes que cambiaron sus dimensiones por el temporal. a) Imagen de Google Earth™. Se observan cárcavas sobre el cerro Vitteau, detrás del colegio Deán Funes, antes del temporal (18/01/2017). b) Imagen de Google Earth™. Se observan cárcavas sobre el cerro Vitteau, detrás del colegio Deán Funes, después del temporal (13/07/2017). c) Imagen de Google Earth™. Se observan cárcavas sobre el cerro Hermitte, detrás del barrio Médanos, antes del temporal (18/01/2017). d) Imagen de Google Earth™. Se observan cárcavas sobre el cerro Hermitte, detrás del barrio Médanos, después del temporal (24/11/2017). e) Fotografía direccionada hacia el norte de la cárcava ubicada detrás del barrio Médanos. Se observan sección transversal en “V” y depósitos junto a las paredes de la cárcava. f) Fotografía direccionada al sureste de la cárcava ubicada detrás del barrio Médanos. Se observan paredes suverticales y material coluvial y aluvial en su base.

Sobre las laderas del cerro Vitteau (**Fig. 28a**) se dan rasgos erosionales similares a las cárcavas, pero de menor tamaño que se denominan *rills*. Estas incisiones se presentan rectas, con un perfil transversal en forma de “V” sobre

pendientes uniformes con inclinaciones mayores a 20° y con formas planas o con curvaturas que produzcan la divergencia del flujo de agua (**Fig. 28c, d**). La profundidad de erosión máxima es de aproximadamente 30 cm y se da sobre el relleno moderno coluvial y aluvial que carece de vegetación. También suele encontrarse en algunos sectores del cerro Hermitte, pero la mayor concentración de estos se da en el cerro Vitteau (**Fig. 28b**).

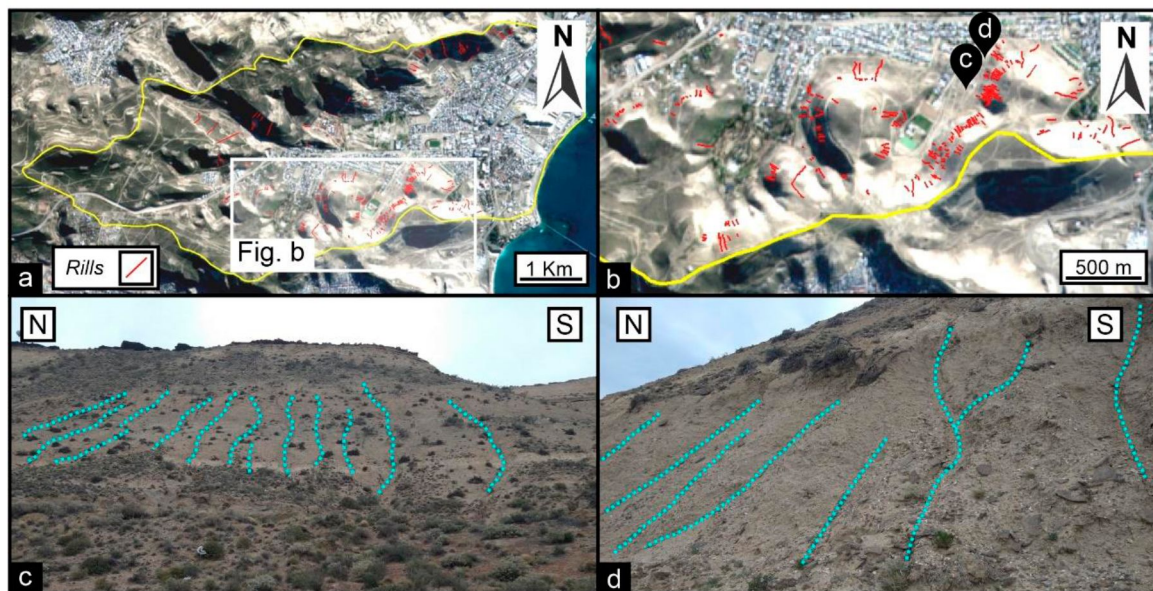


Figura 28. a) Mapeo de Rills en la cuenca de Km. 3. b) Se observa una mayor concentración de Rills sobre las laderas del cerro Vitteau. c y d) Desarrollo de superficies de Rills.

7.6.2. Inundaciones

En los últimos años se han producido recurrentes inundaciones en la zona baja de la cuenca de Km. 3. Durante la tormenta de 2017, las denuncias de ingreso de agua en viviendas y/o inundaciones fueron recopiladas por la aplicación del LabSIG. Retomando esta información, el mapa de la Figura 29 muestra las denuncias de los vecinos que mencionan el ingreso de agua y barro a la vivienda. Estas se observan dispersas en toda la zona urbana pero mayormente ajustadas a la red de drenaje. La gran mayoría se ubica inmediatamente por debajo de los taludes de los cerros Hermitte y Vitteau, sobre pendientes de entre 5° a 20° , y en cercanía del cauce principal (Calle Petrolero San Lorenzo), sobre todo próximas a la zona comercial. En situaciones localizadas se agrupan alrededor de vertientes de importancia donde circula el mayor volumen de flujo que atraviesan los barrios Saavedra, Divina Providencia

y

Sismográfica.

Denuncias de ingreso de agua en la cuenca de Km. 3 (2017), Comodoro Rivadavia, Chubut

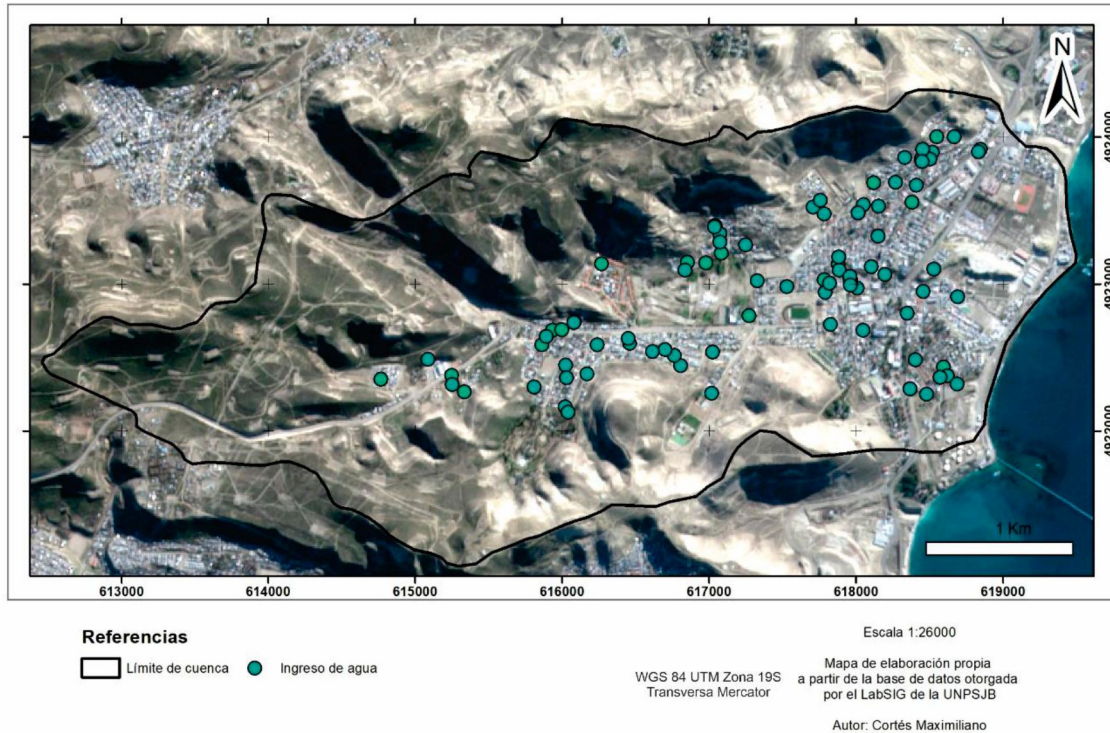


Figura 29. Mapa de denuncias por inundaciones, ingreso de agua y barro a viviendas. Datos aportados por el LabSIG de la UNPSJB (Ver en Anexo).

Durante las precipitaciones intensas del temporal, el flujo de agua circuló por el sistema de drenaje urbano y fundamentalmente por la superficie. En esta última, el tránsito de la escorrentía se dio por superficies de baja permeabilidad y rugosidad, lo que derivó en un importante caudal de agua a gran velocidad (estimado entre 22.54 y 41.9 m³/s). La pileta de decantación al inicio de la calle Petrolero San Lorenzo se vio desbordada y rellena en su totalidad por los sedimentos que acarrea el flujo de agua (**Fig. 30d, e**). Al verse imposibilitada la decantación del material erosionado, estos siguieron su camino hasta la alcantarilla (situada en la intersección de calle Petrolero San Lorenzo y Ruta Nacional N° 3).

Debajo de la calle Petrolero San Lorenzo se encuentra un pluvial (**Fig. 30d**) de hormigón con un área de entrada de 0.24 m² que se expande a 1.14 m² y a mitad de recorrido cambia su sección a 1.44 m² y una pendiente de 3° que mediante la aplicación de la ecuación de Manning resulta en una capacidad de 6.18 m³/s.

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{0.013} * 1.44 \text{ m}^2 * 0.28 \text{ m}^{\frac{2}{3}} * 0.017^{\frac{1}{2}} = 6.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

El sector de mayor problemática fue en la alcantarilla antes mencionada (**Fig. 30b**). Esta se ubica interpuesta al cauce principal, donde confluye el aporte de la mayor parte de la cuenca, en un bajo topográfico y con la presencia de la Ruta Nacional N°3 sobreelevada poco más de 2 m de forma transversal al flujo. Dicha alcantarilla posee un área de 4.5 m², la cual además se vio reducida casi en su totalidad por la presencia de basura y un vehículo arrastrado por la corriente. El pluvial que se conecta a esta, tiene un área de 8.8 m² y una pendiente de 3°, aproximadamente, y su capacidad de drenaje es de 70.25 m³/s.

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{0.013} * 8.8 \text{ m}^2 * 0.71 \text{ m}^{\frac{2}{3}} * 0.017^{\frac{1}{2}} = 70.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

La limitación dada por la alcantarilla, donde el drenaje se vio dificultado y por las características de la Ruta Nacional N° 3 en este sector, resultó en la acumulación de agua hasta una altura aproximada de 2.2 m. Debido a esto, se redujo la velocidad de flujo y se depositaron los sedimentos de tamaño arena y algo de gravas (**Fig. 30c**).



Figura 30. a) Imagen satelital de Google Earth™ de la zona más afectada de Km. 3 por inundaciones. Se observa la posición del cauce principal, la alcantarilla y la Ruta Nacional N°3. El escurrimiento se da de forma superficial y subterránea hasta la alcantarilla, luego de ésta, se da a través de un pluvial subterráneo. b) Alcantarilla obstruida por un vehículo arrastrado por el flujo de agua. La Ruta Nacional N°3 se posiciona aproximadamente 2.2 m por encima de la alcantarilla. c) Depósitos de sedimentos alrededor de la alcantarilla. Predomina la arena fina a muy fina con respecto a las granulometrías tamaño grava. d) Imagen satelital de Google Earth™ de la pileta de decantación del día 18/01/2017, antes de la tormenta. e) Imagen satelital de Google Earth™ de la pileta de decantación colmatada del día 13/07/2017, después de la tormenta.

7.6.3. Asentamientos del terreno

En algunos de los barrios del área de estudio, más precisamente en Divina Providencia, se presentan una serie de patologías sobre las estructuras rígidas. Estas se evidencian mediante fracturas sobre las paredes de las viviendas o medianeras, hundimientos en calles y veredas, combamiento de medianeras e inclinación de postes de alumbrado (**Fig. 31a-c**). En fotografías aéreas antiguas (1970) de este sector se reconocen cárcavas poco desarrolladas ubicadas a favor de la pendiente en donde actualmente se ubica el barrio, que luego por su emplazamiento debieron ser rellenadas (**Fig. 31d**). Según González (Comunicación personal, 7 de noviembre de 2021) explica que durante la construcción del barrio se realizaron rellenos de antiguas cárcavas que

posiblemente no hayan sido debidamente compactadas y una vez terminadas las viviendas este terreno se asentó provocando los daños que se observan. Algo similar ocurre sobre la calle Lago Musters en proximidad del gimnasio del Colegio Deán Funes donde el pavimento presenta severas ondulaciones. Históricamente, tanto dicho gimnasio, la iglesia Santa Lucía como la pileta del Club Huergo presentan fisuras en sus edificios.

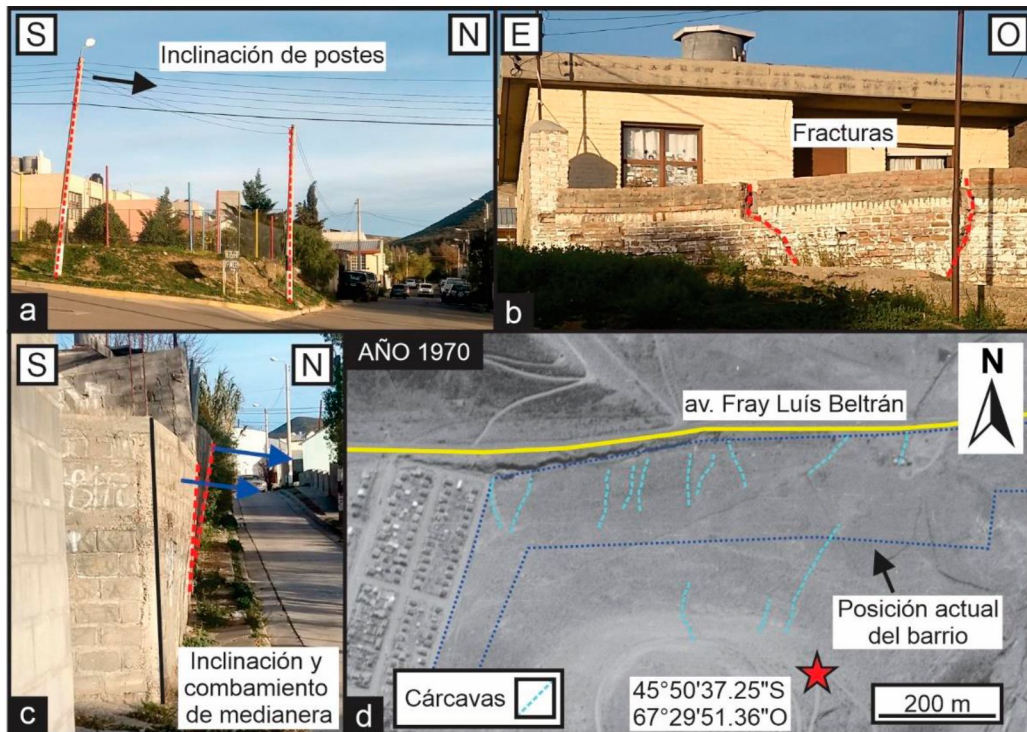


Figura 31. Movimientos de suelo en el barrio Divina Providencia. a) Inclinación de postes. b) Fracturas en cerco. b) Inclinación y combamiento de la medianera. c) Fotografía aérea del año 1970 (IGM). Se observan antiguas cárcavas donde actualmente se emplaza el barrio Divina Providencia.

7.6.4. Remoción en masa

Los procesos de remoción en masa se observan sobre las laderas empinadas de los cerros que limitan la cuenca, donde se destacan los deslizamientos. El barrio Sismográfica se asienta sobre el lóbulo de un deslizamiento que data de 1918 (González et al., 2002) y ocupa un área de más de 3 km². Su cicatriz se ubica a mitad de ladera donde se deja expuesta parte del plano de deslizamiento en la que se observan secuencias de la Fm. Chenque, que además coincide con la trayectoria inferida de la falla B. Inmediatamente debajo de la cicatriz existe una planicie extensa de baja pendiente, con la presencia de algunos bloques caídos (provenientes de la Fm. Chenque). El



lóbulo de deslizamiento presenta de manera caótica bancos de arenisca, arcilita y relleno moderno. Su extensión, en dirección este, alcanza los barrios Marquesado y los Tilos. Hacia el sur limita con la av. Mazaredo y sigue hasta la cancha de “Santa Lucia Golf Club”, y al oeste, con el barrio Médanos (**Fig. 32a, b**). La urbanización en este sector presenta áreas vegetadas con césped y arboledas lo que implica la necesidad de riego y, por ende, infiltración de agua.

Sobre el faldeo oeste del cerro Vitteau, a pocos metros del camino a la “Caballeriza” se desarrolló un deslizamiento (**Fig. 32e, f**) que a diferencia del resto se dio rápidamente durante la tormenta de 2017. Este abarca un área de casi un km² y se encuentra próximo a la falla A. En este caso el agua de la precipitación actuó como lubricante de la superficie de deslizamiento y aportó peso a la masa rocosa inestable. Asimismo, en la base de la ladera se encuentra un loteo de viviendas construido años antes de la tormenta. Debido a su emplazamiento se quitó parte de la sección baja del faldeo para ubicar una calle que, después de la precipitación intensa, fue sepultada por el deslizamiento. Actualmente, nuevamente se realizó un corte a la parte baja de la ladera.

Existen deslizamientos sobre los que no se tienen tantos estudios, pero se observan algunos rasgos geomorfológicos que permiten identificarlos en imágenes satelitales y/o en campo. Uno de los casos se halla en el barrio Extensión de Saavedra (**Fig. 32c, d**), donde por fotografías aéreas de 1970, se observa una cicatriz y el cuerpo lobulado del deslizamiento en proximidad de una locación petrolera, al pie de este. Las imágenes más actuales (2019) no demuestran ningún tipo de movimiento visible respecto a 1970, pero se ha emplazado un barrio a pocos metros del deslizamiento, en el que, por los movimientos de suelo realizados para construir las plataformas de las viviendas se eliminó parte de la base de la ladera.

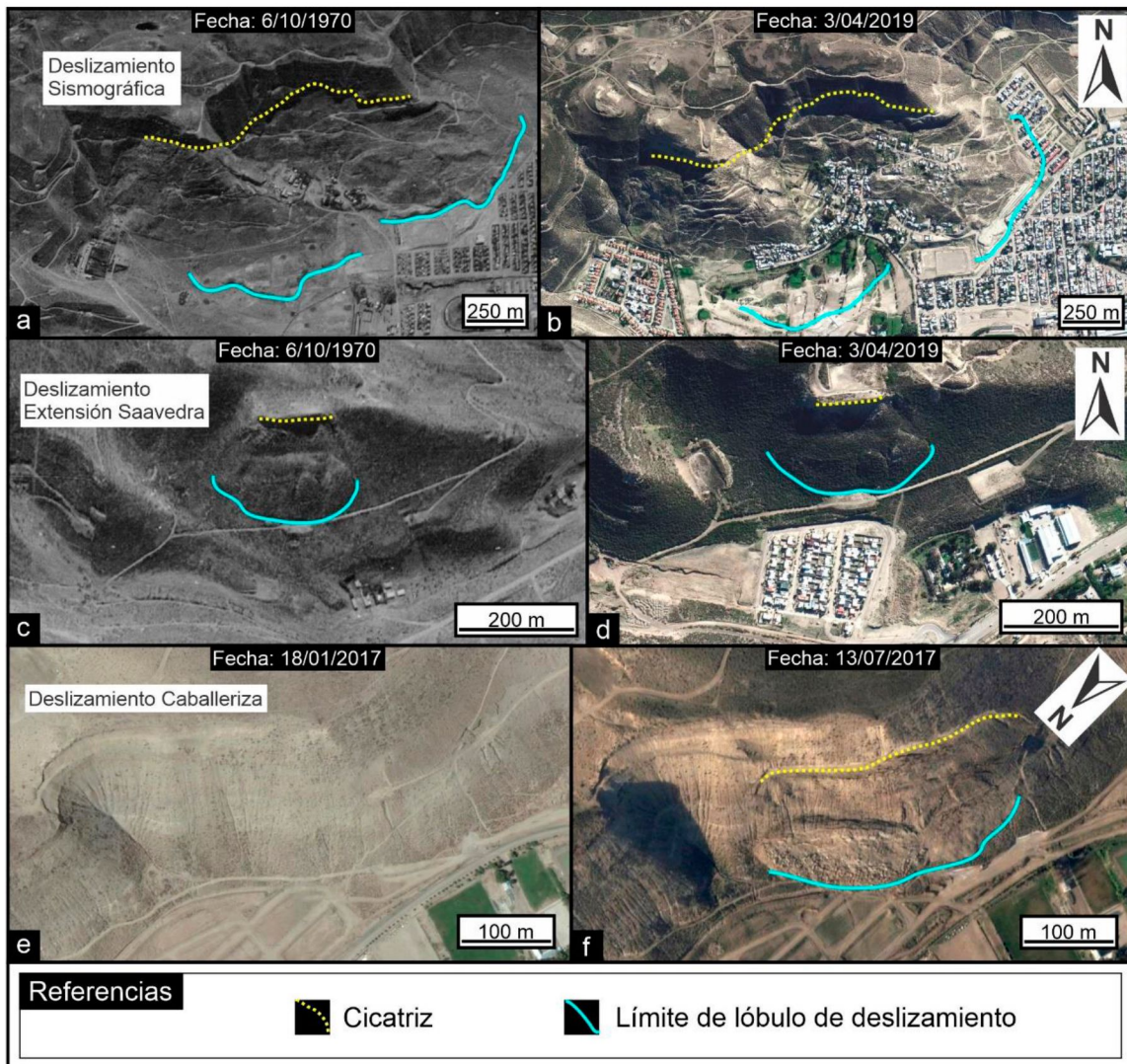


Figura 32. Imagen de los distintos deslizamientos de la zona de estudio, a) Fotografía aérea vertical del año 1970 (IGM) del deslizamiento barrio Sismográfica. b) Imagen satelital de Google Earth™ del día 3/04/19 del deslizamiento barrio Sismográfica. c) Fotografía aérea vertical del año 1970 (IGM) del deslizamiento barrio extensión de Saavedra. d) Imagen satelital de Google Earth™ del día 3/04/19 del deslizamiento barrio extensión de Saavedra. e) Imagen satelital de Google Earth™ del día 18/01/17 del deslizamiento de la “Caballeriza”. f) Imagen satelital de Google Earth™ del día 13/07/17 del deslizamiento de la “Caballeriza”.

Otro de los deslizamientos se encuentra sobre el límite noreste de la cuenca (**Fig. 33a**) a pocos metros del barrio Km. 4, sobre la Ruta Nacional N° 3, donde se hallan una serie de fisuras (dispuestas paralelas al talud del cerro) y hundimientos en el pavimento. Sobre el cerro Hermitte se observan cicatrices de deslizamiento (**Fig. 33b, c**) que en principio evidencian un movimiento hacia el noreste.



Figura 33. a) Deslizamiento de Km. 4. b y c) Fisuras y hundimientos del pavimento.

Por otra parte, el talud medio y superior de la cuenca se ve afectado por caída de bloques, flujo de detritos y barro. La caída de bloques se encuentra mayormente relacionada a los sitios donde se hallan bancos de coquinas en la cima de los cerros (**Fig. 34a**). A través de imágenes satelitales de Google Earth™ ($45^{\circ}50'31.18''S$ $67^{\circ}29'17.12''O$) se observa que un bloque de unos 7 m de largo se desplazó pendiente abajo desde el banco de coquinas, ubicado en la cima, a su posición final, a mitad de ladera (**Fig. 34a**). Esto ocurrió durante las lluvias de 2017. La mayoría de los bloques se caracterizan por tener formas planares conformados por dos ejes de elongación de tamaños similares (desde aproximadamente 7 m a unos pocos centímetros) y un tercer eje perpendicular al resto de menor longitud, lo que le otorga mayor dificultad a la rodadura y, por tanto, una menor distancia de recorrido durante su transporte, alcanzando como máximo el talud medio (**Fig. 34d**). Se suelen ubicar sobre caminos o bermas que cortan las laderas y/o vinculados espacialmente a la posición de grandes cárcavas y cauces. Los flujos de barro ($45^{\circ}50'31.64''S$ $67^{\circ}29'21.03''O$) transportan arcillas, limos y arenas (**Fig. 34c**), en tanto los flujos de detritos

($45^{\circ}49'44.91''\text{S}$ $67^{\circ}29'17.67''\text{O}$) contienen bloques de coquinas, gravas y valvas de ostreas fósiles, en una matriz de materiales finos (**Fig. 34b**).

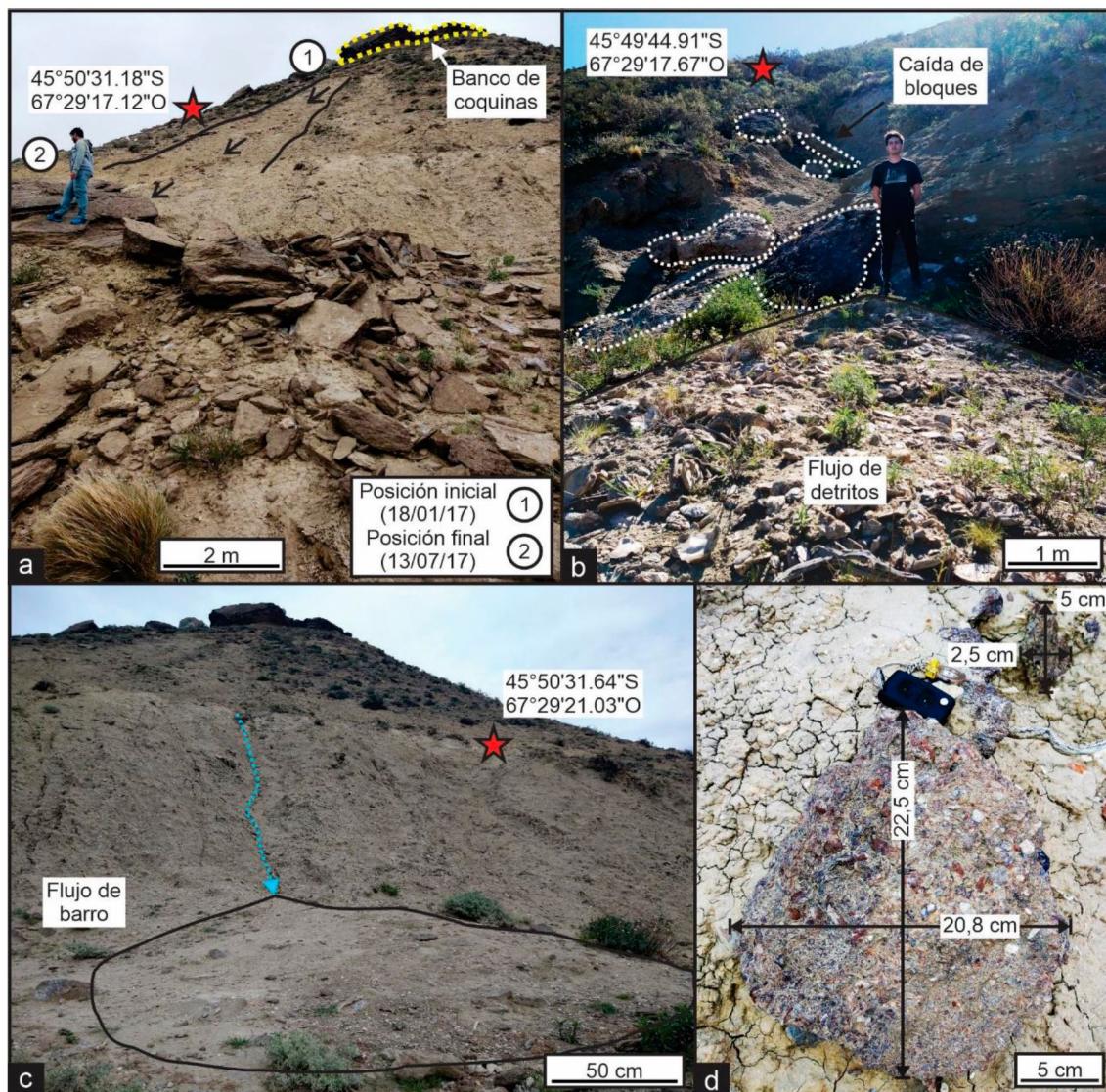


Figura 34. a) Caída de bloques de coquina sobre el talud medio-superior del cerro Viteau. b) Caída de bloques de coquina y flujo de detritos depositados sobre camino en la ladera del cerro Hermitte asociados a un cauce. c) Flujo de barro depositado sobre camino ubicado en el talud del cerro Vitteau. d) Se observan los bloques y clastos de menor tamaño que movilizan los procesos de remoción en masa.

7.6.6. Afloramiento de agua subterránea

En la cuenca de Km. 3 se identifica la presencia de depósitos salinos blanquecinos alrededor del afloramiento de agua que alcanzan la superficie en taludes, más precisamente, en el camino Roque González (**Fig. 35b**), en el faldeo que se ubica detrás del barrio Saavedra (**Fig. 35c**) y en una de las cárcavas en inmediaciones del barrio Médanos (**Fig. 35d**). En la mayoría se

observa drenaje semanas después de eventos de precipitación. También, son comunes en el límite inferior del lóbulo de deslizamiento sobre la cancha de “Santa Lucía Golf Club” (**Fig. 35e**). En el Corralón Municipal (**Fig. 35g**) y a lo largo de la calle Miguel Sosa (**Fig. 35f**) el agua fluye durante gran parte del año.



Figura 35. a) Se señala en el área de Km. 3 los sitios donde existe afloramiento de agua subterránea. b) Sector del camino Roque González. c) Cañadón detrás del barrio Saavedra. d) Cañadón en barrio Médanos. e) Cancha de Santa Lucía Club Golf. f) Calle Miguel Sosa. g) Corralón Municipal.

7.6.7. Erosión costera

En general la costa de la cuenca de Km. 3 se encuentra conformada por intercalaciones de playas de grava y acantilados. Estos últimos, en su gran mayoría se ven afectados por la acción erosiva en media caña, producto de la abrasión de partículas y por acción hidráulica del oleaje que dan como resultado procesos de remoción en masa, como caída de rocas, lo que conduce a un retroceso de la línea del acantilado también acelerado por el desarrollo de cárcavas sobre los bordes elevados.

En el sitio de estudio, los acantilados activos pueden hallarse en las salientes del sector del muelle de YPF y Hospital Alvear (**Fig. 36a**). Si bien ambos presentan estructuras de protección, en la zona del Hospital el oleaje la ha deteriorado (**Fig. 36b**). Al sur del Hospital existe una plataforma que se sitúa sobre terrenos que antiguamente ocupaba el mar en el cual, para el período 2015-2019, la línea del acantilado retrocedió aproximadamente 4 a 5 m (**Fig. 36c**). Este lapso de tiempo es elegido debido a que los cambios generados en la plataforma por el relleno antrópico son mínimos. En el Chalet Huergo también se

observan procesos de retracción de acantilados que alcanzan una tasa de erosión de 1.2 m/año entre los años 2003 y 2021 (**Fig. 36d**).

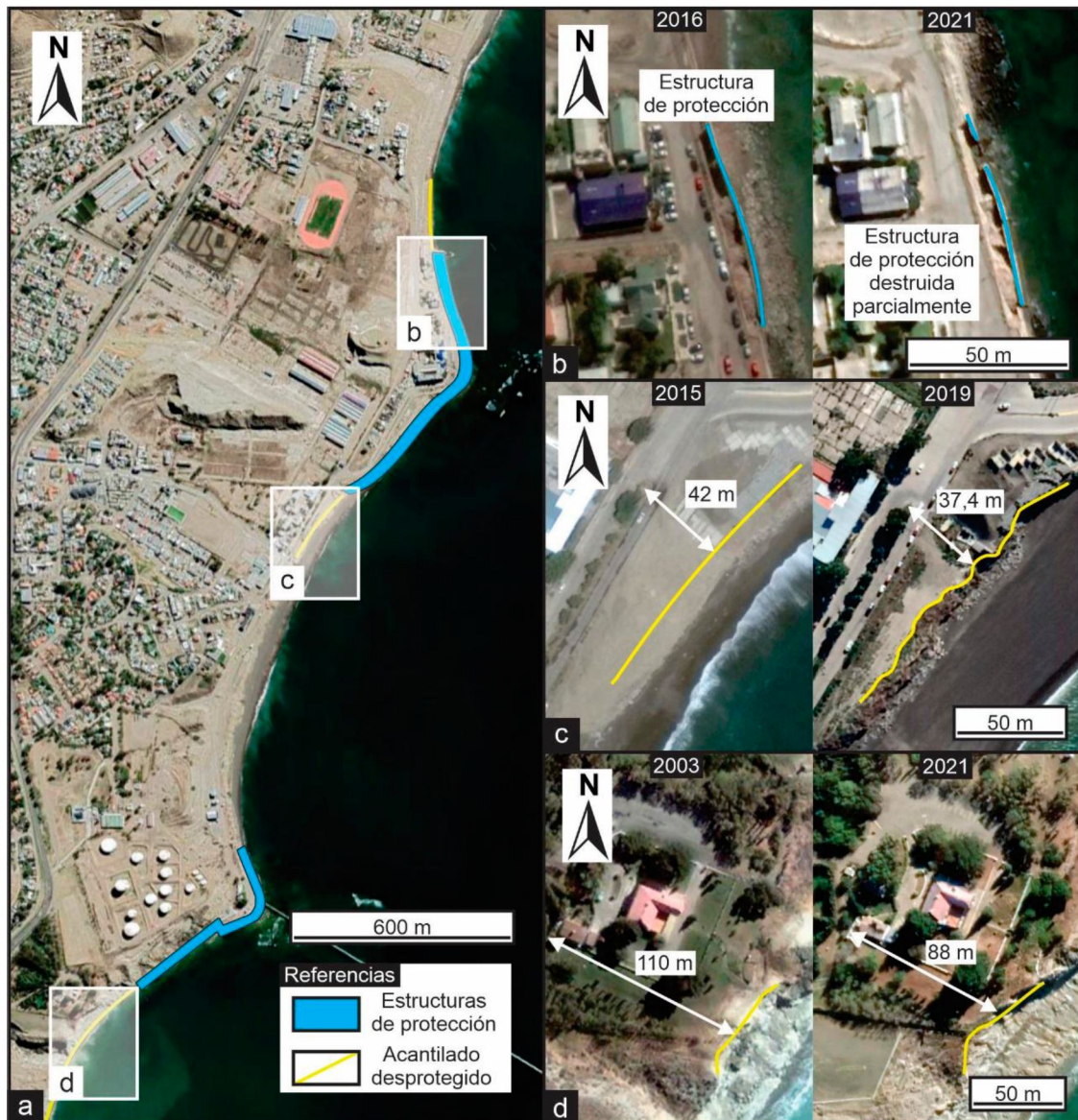


Figura 36. a) Imagen satelital de Google Earth™ de la costa de Km. 3. Se señalan sectores de acantilados con y sin estructuras de protección. b) Sector del Náutico de Km. 3. Se observa, entre los años 2016 y 2021, como la erosión costera logró deteriorar parte de la estructura de protección. c) Imagen satelital de Google Earth™ donde se observa una plataforma afectada por la acción del oleaje lo que produce la retracción de este (entre los años 2015 y 2019). d) Imagen satelital de Google Earth™ el área del Chalet Huergo presenta una pérdida de terreno por la erosión costera.

7.7. Mapas temáticos

La cartografía resultante se relaciona con las variables ambientales que intervienen en el sitio de estudio, cada una compuesta por distintos atributos o

unidades que expresan los procesos geológicos actuantes sobre los distintos sectores de la cuenca de drenaje y, a su vez, su vinculación con la peligrosidad que generan.

a) Mapa Geomorfológico (Fig. 38)

La sección alta de la cuenca, denominada terraza estructural, alcanza la altura de entre 250 m y 365 m. Presenta un relieve plano a levemente ondulado. Estas geoformas, en general, se encuentran conformadas por bancos consolidados de coquinas y areniscas, propios de la Formación Chenque. Estas características representan una muy baja peligrosidad (**Tabla 7**) teniendo en cuenta la estabilidad del terreno sobre todo a bajas pendientes. Sin embargo, los bordes de las terrazas coincidentes con el inicio del talud superior pueden sufrir procesos de remoción en masa, particularmente deslizamientos y caídas de bloques en sectores localizados, y erosión hídrica.

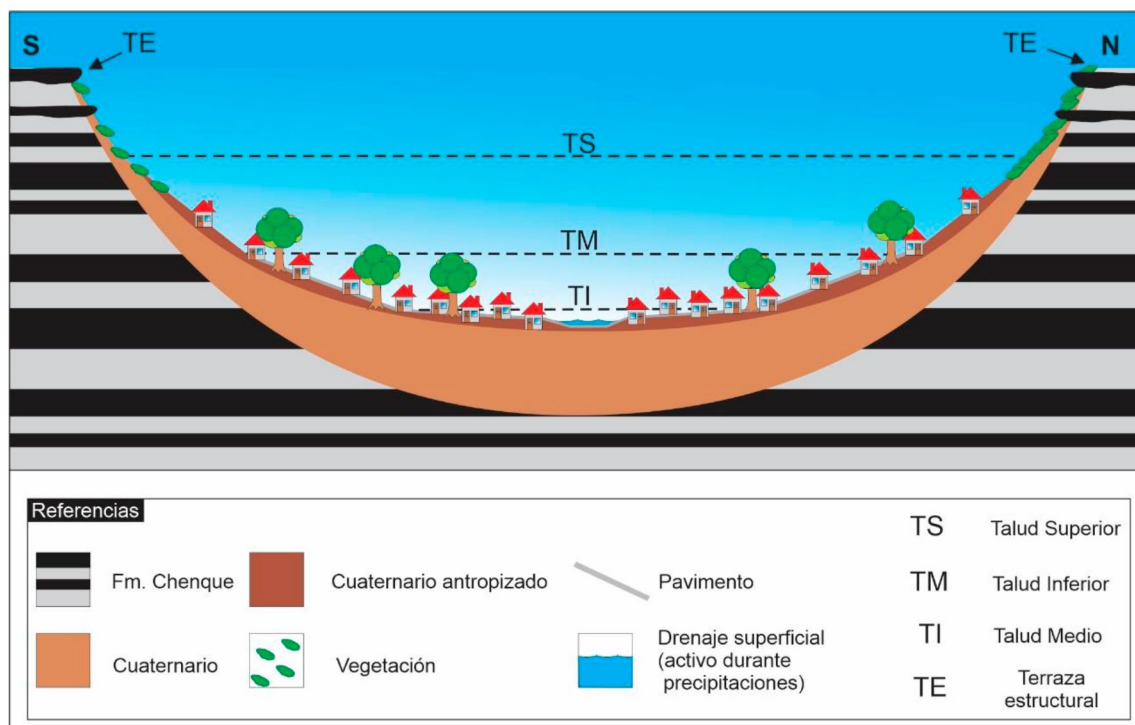


Figura 37. Perfil transversal de la cuenca de Km. 3. Se observan geoformas como Terrazas estructurales, Talud superior, medio e inferior y Fondo de valle.

En el perfil esquemático transversal (**Fig. 37**) se aprecia que, morfológicamente en los faldeos se diferencian tres sectores en función de los quiebres de pendiente el talud superior, talud medio y talud inferior.

El talud superior se presenta inmediatamente por debajo de la terraza estructural rodeando toda la cuenca. Posee una pendiente abrupta y se



caracteriza por rocas de la Formación Chenque compuestas por arcilitas, areniscas y coquinas que se encuentran aflorantes en la parte superior del faldeo alto que hacia abajo se ven tapizadas por depósitos aluviales y coluviales modernos, de espesor creciente a medida que se desciende por las laderas. Debido a la gran inclinación de estas últimas, y teniendo en cuenta que la cubierta de sedimentos es friable y sus rocas de baja resistencia por su fracturamiento y meteorización, se ve favorecida la ocurrencia de procesos de remoción en masa, como deslizamientos, y caída de bloques, en conjunto con la erosión hídrica evidenciada por cauces de 1° y 2° orden, cárcavas y superficies de *rills*, configura un cuadro de alta peligrosidad (**Tabla 7**) para eventuales instalaciones de infraestructura urbana de cualquier naturaleza.

El talud medio se caracteriza por una pendiente media a baja. Sobre esta sección actúan procesos de remoción en masa similares a la del talud superior, pero de menor intensidad en lo referente a caída de bloques y detritos. Sin embargo, es el tramo donde se desarrollan las partes distales o bajas de los lóbulos de deslizamiento y en el cual alcanzan mayor relevancia los procesos de reptaje. Los cauces del talud medio son principalmente de 3° Orden. A pesar de que los procesos geomorfológicos son sumamente activos sobre esta porción de la ladera (en sectores específicos considerados de alta peligrosidad, ver **Tabla 7**) la urbanización igualmente se ha ido consolidando históricamente ascendiendo por las laderas donde las pendientes se lo permitían, asumiendo un grado creciente de peligrosidad.

El talud inferior define la parte baja de la ladera. Aquí actúan mayormente procesos de depositación formados por sedimentos finos provenientes de las laderas que caen por gravedad o son acarreados por las corrientes de agua, y en zonas localmente planas pueden depositar lodos compuestos de arenas finas limo-arcillosas. Estas características le otorgan a esta unidad geomorfológica una peligrosidad media a baja (**Tabla 7**), en general, a excepción de las zonas de escurrimiento concentrado durante las tormentas, donde la erosión hídrica provoca cárcavamientos, anegamientos y acumulación de sedimentos en sitios localizados con drenaje restringido. El área baja de la cuenca, denominada fondo de valle, comparte características geológicas, urbanísticas y fluviales similares a las descritas para el talud inferior. Principalmente se diferencia por una pendiente menor y la presencia del cauce principal. Esto implica una media a

baja peligrosidad (**Tabla 7**) frente a los procesos geológicos que puedan desencadenarse requiriéndose, no obstante, una atención específica sobre pendientes localmente elevadas por causas naturales o desmontes existe la probabilidad de reptaje, donde la peligrosidad podría aumentar puntualmente. Estas zonas bajas en algunos sitios presentan drenaje restringido lo que genera anegamientos, inundaciones y/o acumulaciones de sedimentos durante los eventos de precipitación, al igual que el cárcavamiento por erosión debido al flujo hídrico concentrado. En estos sitios específicos, mediante valoraciones particularizadas, la peligrosidad puede crecer hasta hacerse muy alta.

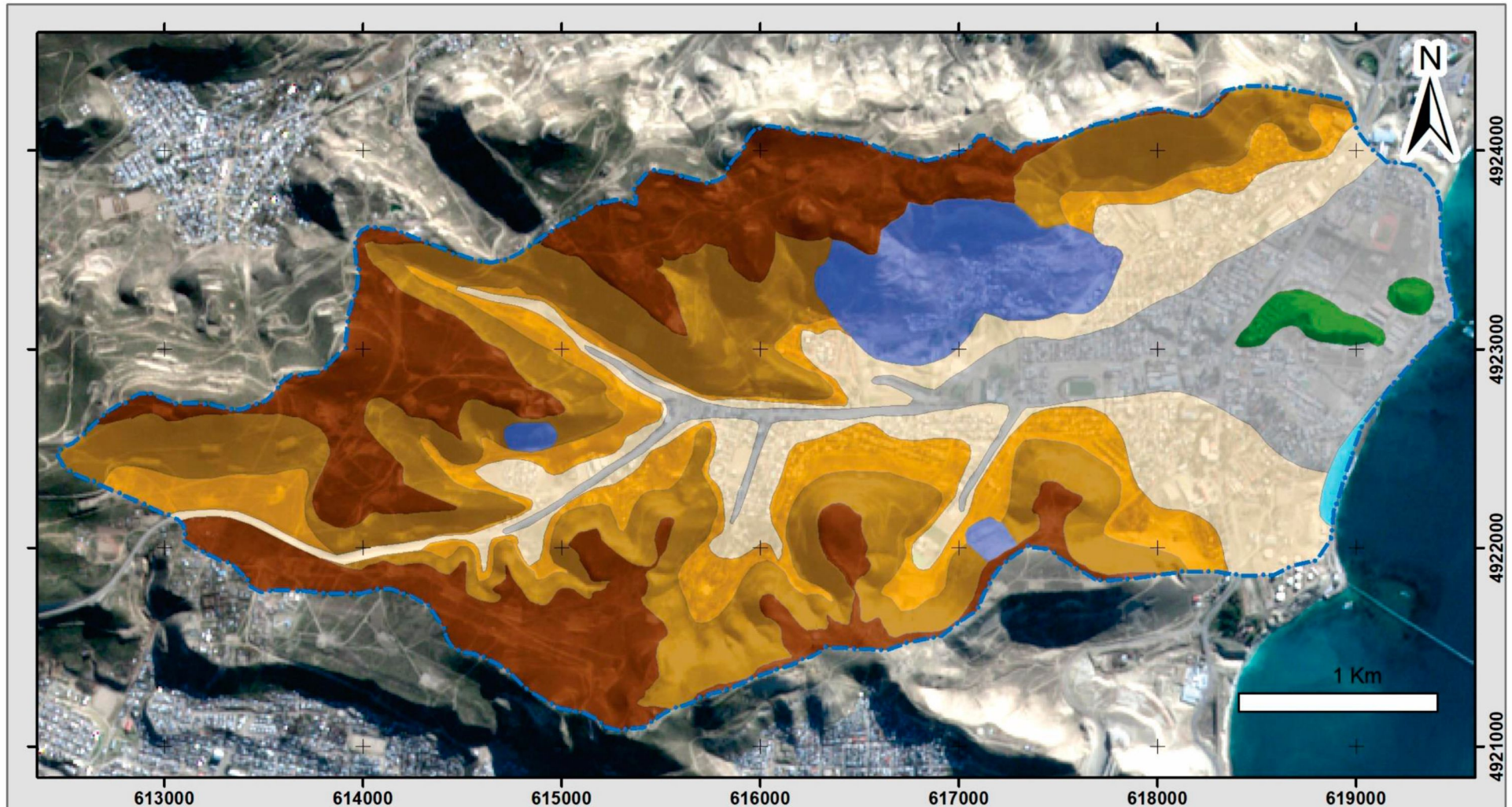
Hacia la zona costera de la cuenca se observan pequeñas mesetas aisladas denominadas por González et al. (2002) como relictos de terrazas estructurales erosionadas. Sus escasas dimensiones hacen que los taludes que los rodean tomen preponderancia, lugar donde se ven favorecidos los procesos de movimientos de laderas y erosión hídrica que configuran una peligrosidad media a alta. La franja costera presenta intercalaciones de playas de grava y acantilados activos que se ven afectados por el ascenso y descenso de las mareas, y la acción erosiva del oleaje, lo que representa una zona de muy alta peligrosidad (**Tabla 7**).

Sobre algunas de las laderas de la cuenca se evidencian procesos de deslizamientos que afectan los barrios Sismográfica, sector de la “Caballeriza”, Extensión de Saavedra y Km. 4. Todos estos sectores son valorados como de muy alta peligrosidad (**Tabla 7**).

| <i>Mapa Geomorfológico</i> | <i>Factor de influencia o peso</i> | |
|--|------------------------------------|-------------------|
| | <i>Peligrosidad</i> | <i>Valoración</i> |
| <i>Atributo</i> | | |
| <i>Terraza estructural</i> | <i>Muy baja</i> | 9 |
| <i>Talud Inferior</i> | <i>Media a baja</i> | 4 |
| <i>Talud Medio</i> | <i>Alta</i> | 2 |
| <i>Talud Superior</i> | <i>Muy alta</i> | 1 |
| <i>Fondo de Valle</i> | <i>Media a baja</i> | 5 |
| <i>Deslizamiento</i> | <i>Muy alta</i> | 1 |
| <i>Depósitos costeros</i> | <i>Muy alta</i> | 1 |
| <i>Relicto de terraza estructural erosionada</i> | <i>Media a alta</i> | 3 |

Tabla 7. Valoración de las unidades geomorfológicas en función de la peligrosidad geológica que generan.

Mapa geomorfológico de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

| | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------|---|
| Límite de cuenca | Unidades geomorfológicas | Talud Medio | Fondo de Valle |
| Terraza Estructural | Talud Inferior | Depósitos costeros | Relicto de terraza estructural erosionada |
| Talud Superior | Deslizamiento | | |

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia
en base a imágenes satelitales Sentinel 2
y de alta resolución (Google Earth).

Autor: Cortés Maximiliano
WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Figura 38. Mapa Geomorfológico.
pág. 77

b) Mapa Geológico (Fig. 39)

El área de estudio presenta dos grandes grupos de rocas que se caracterizan principalmente por el grado de consolidación, también relacionado a su edad. En general, la más antigua presenta un grado de litificación mayor (Fm. Chenque), por lo que brindan mayor resistencia frente a los procesos erosivos que las rocas más modernas (Cuaternario). La Formación Chenque aflora en la cima de las terrazas estructurales e inmediatamente debajo de ellas sobre la parte cuspidal del talud superior o sectores de muy alta pendiente, exponiendo secuencias de arcilita, arenisca y coquinas. En algunos sectores como el barrio Sismográfica y “Caballeriza”, exponen que han sufrido procesos de deslizamiento, lo que la categoriza en estas secciones como de muy alta peligrosidad (**Tabla 8**). Las rocas cuaternarias son depósitos aluviales y coluviales que cubren gran parte de la cuenca de Km. 3, desde los faldeos hasta las zonas bajas. Al no contar con una gran consolidación son más susceptibles a la erosión hídrica al igual que las que se encuentran antropizadas, por lo que la peligrosidad es intermedia o moderada.

Sobre la costa se encuentran depósitos de playa conformados en su totalidad por gravas. Estos sufren el retrabajo por parte de los ascensos y descensos de la marea y la acción del oleaje que en la valuación de peligrosidad son consideradas de un grado muy alto (**Tabla 8**).

| <i>Mapa Geológico</i> | <i>Factor de influencia o peso x 1,5</i> | |
|--------------------------------------|--|-------------------|
| <i>Atributo</i> | <i>Peligrosidad</i> | <i>Valoración</i> |
| <i>Formación Chenque</i> | <i>Baja</i> | <i>7</i> |
| <i>Cuaternario</i> | <i>Media</i> | <i>3</i> |
| <i>Cuaternario “antropizado”</i> | <i>Media</i> | <i>3</i> |
| <i>Formación Chenque “deslizado”</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |
| <i>Depósitos costeros</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |

Tabla 8. Valoración de las unidades geológicas en función de la peligrosidad geológica que generan.

Mapa geológico de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut.

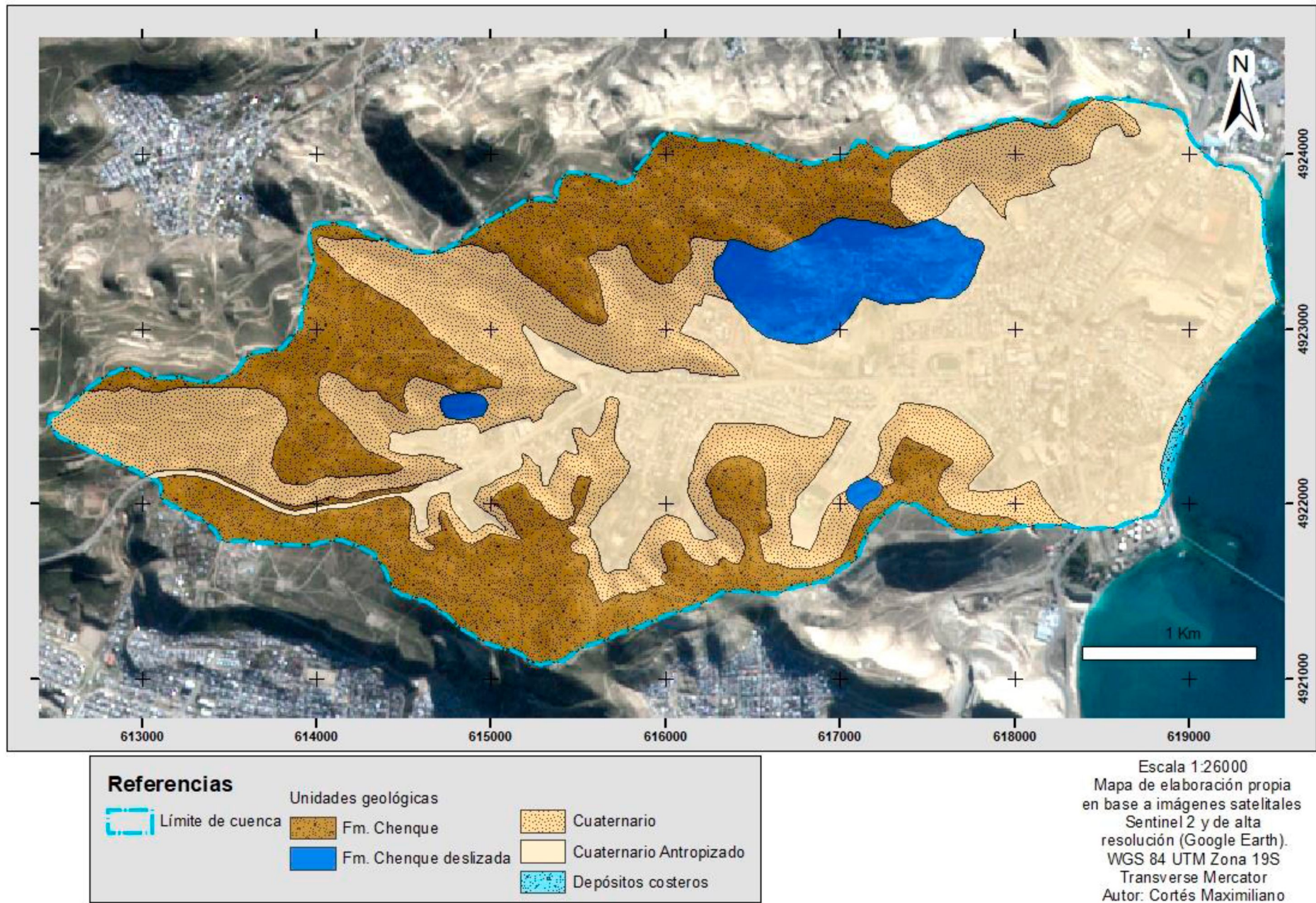


Figura 39. Mapa geológico.
pág. 79

c) Mapa de zona de influencia fluvial (Fig. 40)

Este mapa representa el sistema de drenaje de la cuenca en el que todos los cauces son analizados arealmente utilizando una zona de influencia de 20 m. Esta última permite generar un área de flujo encauzado donde el caudal de agua que fluye es el mayor o el más importante de la cuenca, por lo que corresponde con una valoración de alta peligrosidad geológica e hidrometeorológica (**Tabla 9**). El resto de la superficie de la cuenca se divide en flujo no encauzado y flujo subordinado asociado a áreas urbanas.

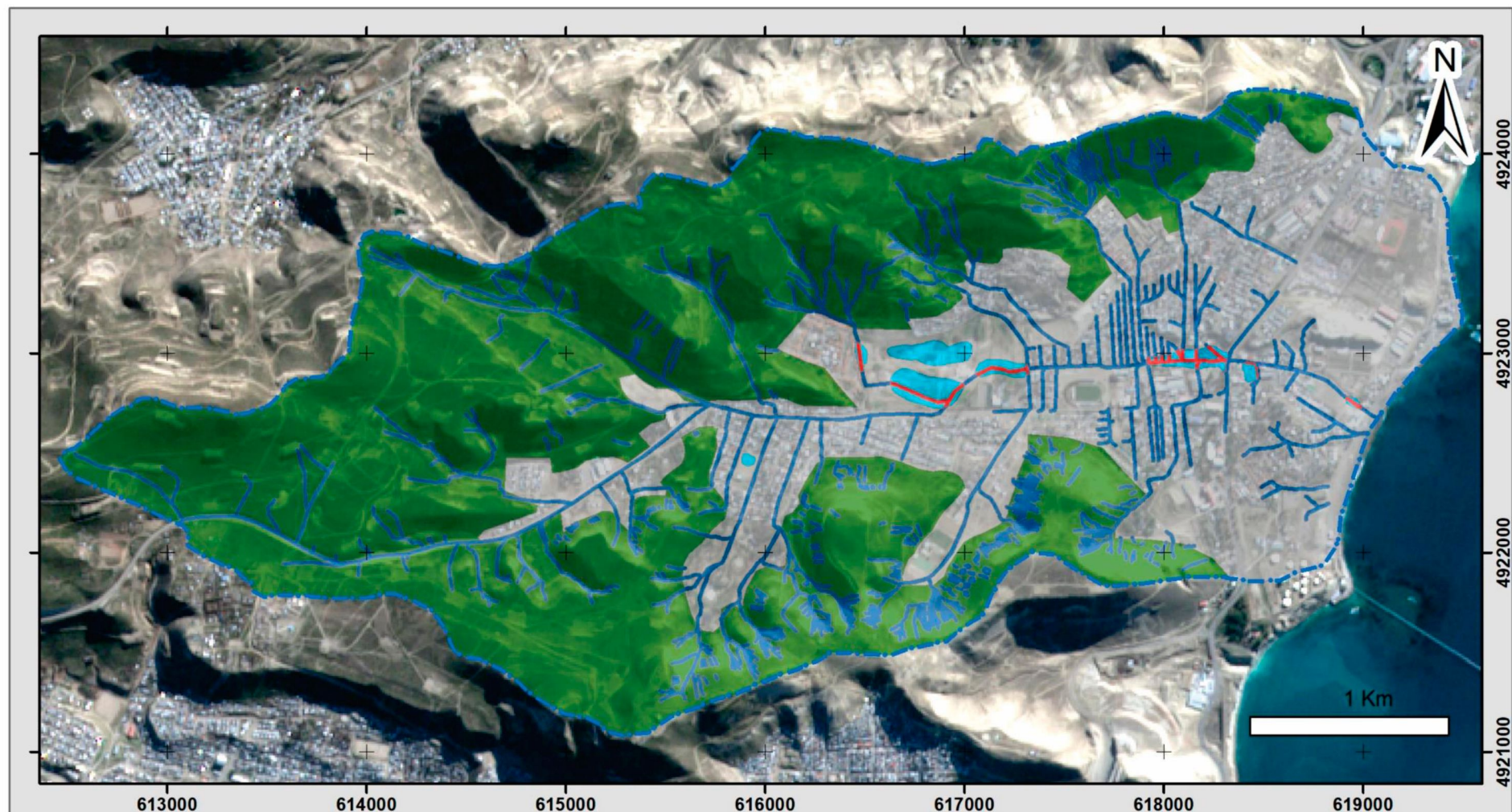
El flujo subordinado ocupa zonas urbanas en las que el escurrimiento superficial se encuentra limitado predominantemente a la colección de agua en techos de viviendas, patios, calles y canalizaciones del drenaje donde el impacto de la escorrentía resulta poco significativo, en la medida que dicho flujo no termine afectando el espacio urbano con anegamiento y/o erosión o depositación de sedimentos. En situaciones de esta naturaleza los espacios afectados poseen una categorización de peligrosidad alta a muy alta dentro del rango (**Tabla 9**).

El flujo no encauzado pertenece al área de la cuenca conformada por las laderas de los cerros y terrazas estructurales, donde no hay importantes cauces definidos y el escurrimiento superficial ocurre predominantemente en forma de manto. Este tipo de flujo sobre los faldeos puede ser el desencadenante de procesos de remoción en masa, carcavamiento y *piping*., y por ello se califica estas áreas como de media a alta peligrosidad (**Tabla 9**).

| <i>Mapa de influencia fluvial</i> | <i>Factor de influencia o peso x 4</i> | |
|--|--|-------------------|
| | <i>Peligrosidad</i> | <i>Valoración</i> |
| <i>Flujo Encauzado</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |
| <i>Flujo Encauzado con posibilidad de inundación</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |
| <i>Flujo No Encauzado</i> | <i>Media a alta</i> | <i>3</i> |
| <i>Flujo Subordinado en áreas urbanas</i> | <i>Baja a media</i> | <i>7</i> |
| <i>Flujo Subordinado con posibilidad de inundación</i> | <i>Alta</i> | <i>2</i> |

Tabla 9. Valoración de los tipos de flujos en función de la peligrosidad geológica que generan.

Mapa de influencia fluvial de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

| | | |
|--|---|--|
|  Límite de cuenca | Tipo de drenaje |  Flujo No Encauzado |
|  Flujo Encauzado |  Flujo Subordinado en Zona Urbana |  Flujo Subordinado en Zona Urbana con inund./aneg. |
|  Flujo Encauzado con inund./aneg. | | |

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia en base a imágenes satelitales Sentinel 2 e imágenes de alta resolución (Google Earth) WGS 84 UTM Zona 19S Transversa Mercator Autor: Cortés Maximiliano

Figura 40. Mapa de zona de influencia fluvial.
pág. 81

d) Mapa de Pendientes (Fig. 41)

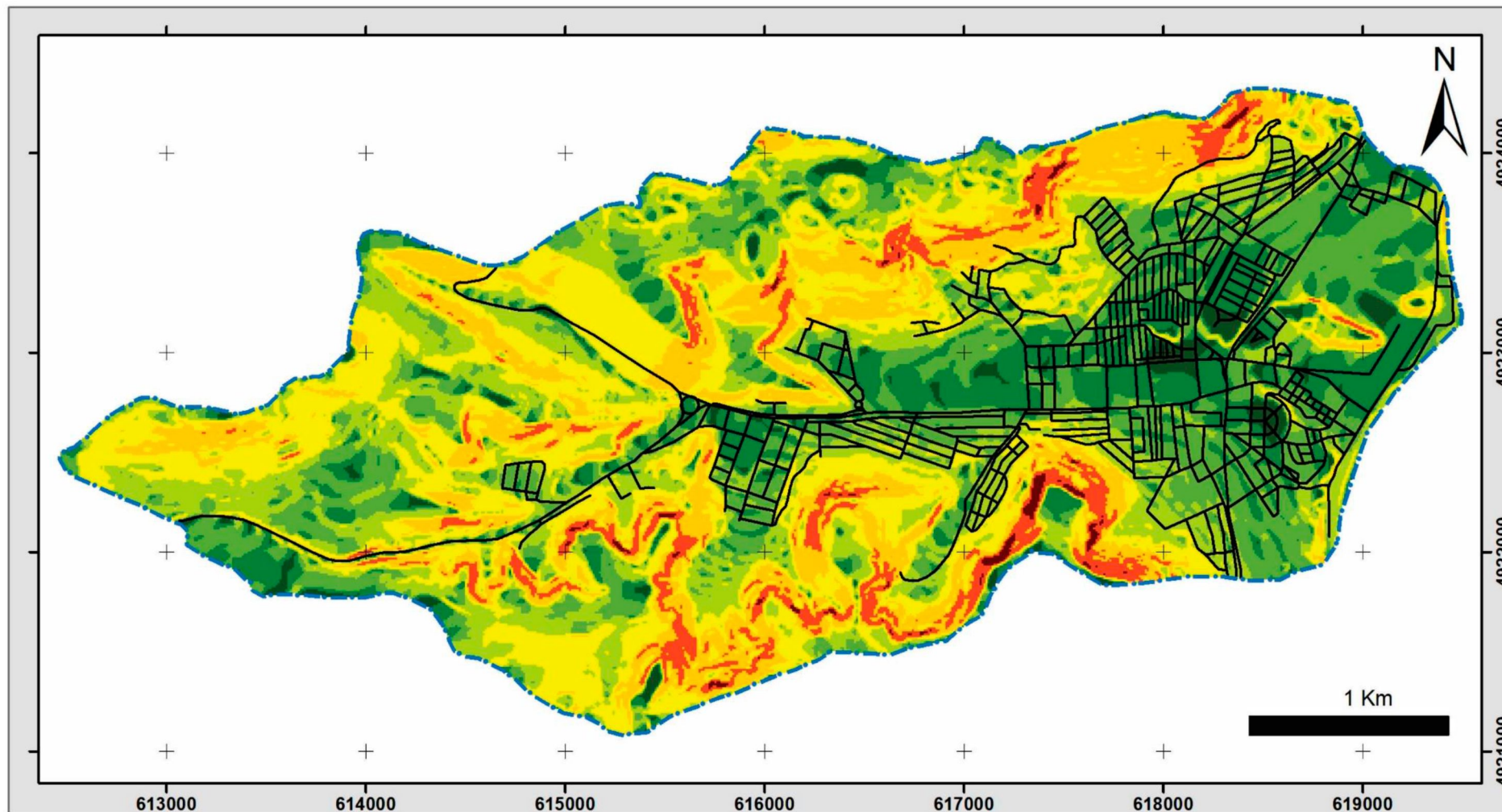
Las pendientes de la cuenca varían desde 0° a 63°. En general, las mayores (rango comprendido entre 30° y 63°) predominan en forma de franja más o menos continua sobre el talud superior del Cerro Vitteau, y de modo saltuario en el faldeo del Hermitte que están mayormente relacionadas a los resaltos topográficos generados por los deslizamientos. El resto de la ladera sur del Cerro Hermitte, se caracteriza por inclinaciones que varían predominantemente de 20° a 30°. La mayor parte de la urbanización se encuentra ubicada sobre pendientes que van de 0° a 5°, coincidiendo con la unidad geomorfológica fondo de valle y talud inferior. A partir de allí el ejido urbano se expande históricamente ascendiendo hacia el talud medio de los cerros antes mencionados, en el que se alcanzan los 10° de inclinación como máximo. Sobre las terrazas estructurales se presentan pendientes menores a 10°. Se observa el caso particular del barrio Sismográfica, asentado sobre el lóbulo del deslizamiento, y siendo el único de la cuenca que se ubica sobre laderas que inclinan entre 10° y 20°, alcanzando máximos de 30°, aproximadamente.

Para llevar a cabo la valoración de peligrosidad se tuvo en cuenta el trabajo de Vidal (2018) del que se tomaron los intervalos de inclinación de pendiente como modelo. Si bien las pendientes menores implican una menor peligrosidad geológica que va aumentando a medida que aumenta la inclinación, los valores cercanos a 0° indican la posibilidad de generar zonas inundables, acumulación de sedimentos y/o erosión, por lo que su peligrosidad es baja a media (**Tabla 10**).

| <i>Mapa de pendientes</i> | <i>Factor de influencia o peso</i> | |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------|
| | <i>Peligrosidad</i> | <i>Valoración</i> |
| <i>0°</i> | <i>Baja a media</i> | <i>7</i> |
| <i>0° – 2.5°</i> | <i>Baja</i> | <i>9</i> |
| <i>2.5° – 5°</i> | <i>Baja</i> | <i>8</i> |
| <i>5° – 10°</i> | <i>Media</i> | <i>5</i> |
| <i>10° – 20°</i> | <i>Media a alta</i> | <i>3</i> |
| <i>20° – 30°</i> | <i>Alta</i> | <i>2</i> |
| <i>30° – 45°</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |
| <i>45° – 63°</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |

Tabla 10. Valoración de la inclinación de la pendiente en función de la peligrosidad geológica que generan.

Mapa de pendientes de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



| Referencias | |
|------------------|---------------|
| Límite de cuenca | Pendiente (°) |
| Calles | 0° |
| | 0° - 2.5° |
| | 2.5° - 5° |
| | 5° - 10° |
| | 10° - 20° |
| | 20° - 30° |
| | 30° - 45° |
| | 45° - 63° |

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia en base a curvas de nivel obtenidas por dron con una resolución espacial de 5 m.

Autor: Cortés Maximiliano

WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Figura 41. Mapa de Pendientes.
pág. 83



e) Mapa de cobertura vegetal (Fig. 43)

La cobertura vegetal de la cuenca no presenta gran densidad, pero se logran diferenciar sectores donde esta varía, aumentando en algunos debido a la cantidad de humedad del suelo en función de su exposición solar, vinculación con geoformas favorables y preservación de la afectación antrópica.

El Cerro Vitteau se caracteriza por poseer la menor cobertura vegetal en comparación con los cerros que lo rodean debido a que sufre una mayor insolación y, además, presenta la mayor proporción de altas pendientes. Como consecuencia, la cobertura vegetal es nula o esporádica, dicho en términos porcentuales, logra alcanzar un promedio de aproximadamente 6% (**Fig. 42a**). No obstante, donde la inclinación disminuye levemente, la vegetación incrementa llegando a un valor bajo, que se aproxima al 38% (**Fig. 42b**). Hacia el sector oeste la flora se incrementa, alcanzando aproximadamente el 60%. Esta se clasifica como cobertura vegetal moderada (**Fig. 42c**).

El cerro Hermitte presenta menor heliofanía, lo que se traduce en una mayor humedad del suelo y por ende una cubierta vegetal que supera el 89%, considerada como alta (**Fig. 42d**). Solo en las zonas aledañas al deslizamiento

posee una cobertura media.

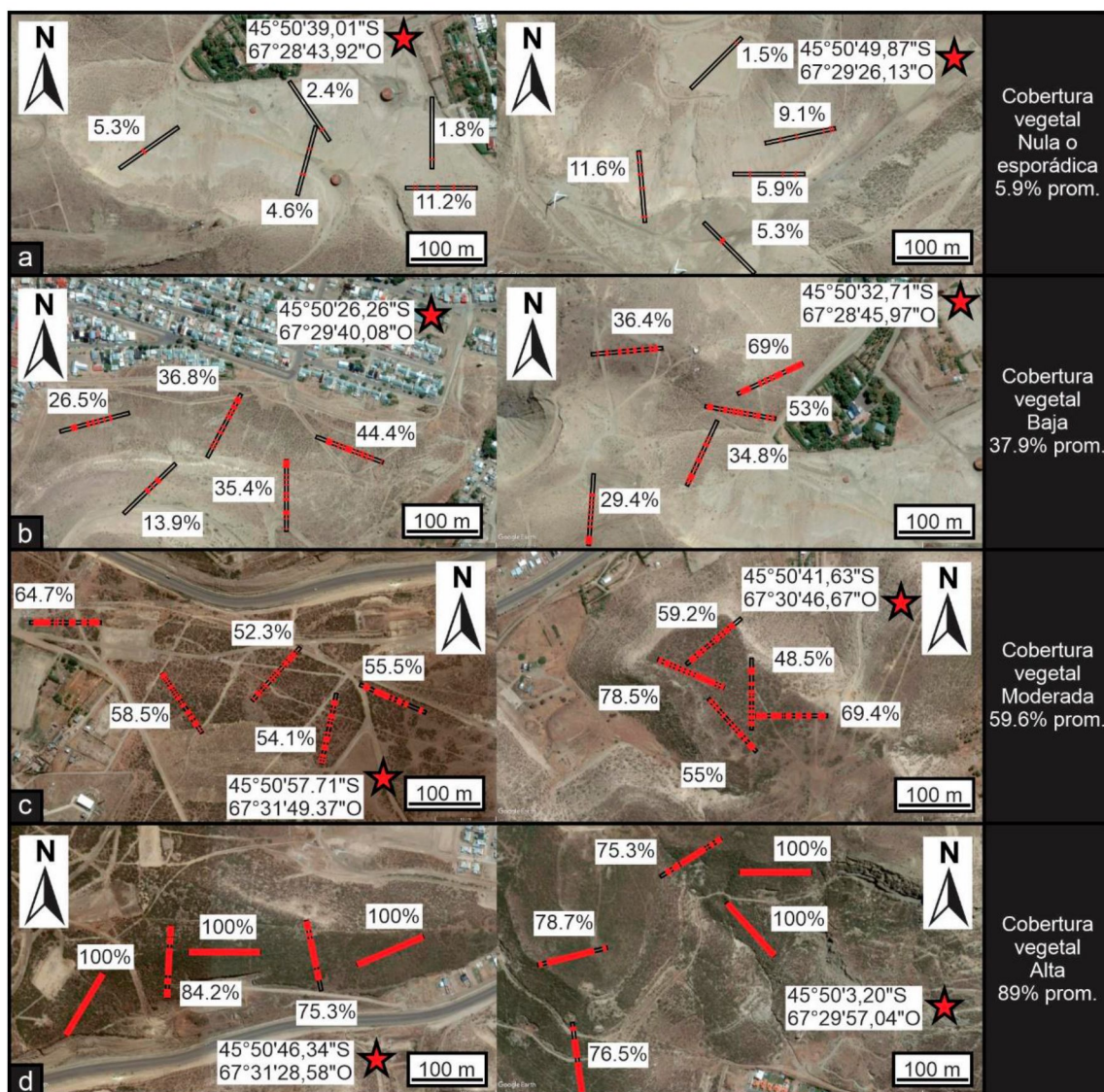


Figura 42. Imagen de las distintas coberturas de vegetación sobre la cuenca de Km. 3, a) Cobertura vegetal nula a esporádica. b) Cobertura vegetal baja. c) Cobertura vegetal media. d) Cobertura vegetal alta.

La actividad petrolera en la Cuenca del Golfo San Jorge genera grandes modificaciones en el uso del suelo debido a la construcción de locaciones y caminos para la extracción del hidrocarburo. Esto puede observarse sobre las mesetas y faldeos que rodean a la cuenca de Km. 3, donde la cobertura vegetal alcanza valores bajos a nulos, al igual que los que se encuentran urbanizados, donde la escasa vegetación que puede observarse es producto de la introducción antrópica de especies exóticas.

La ausencia o escasez de vegetación aumenta la susceptibilidad del suelo a la erosión por lo que los terrenos con alta cobertura vegetal se caracterizan por

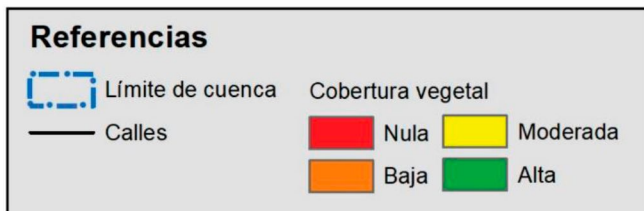
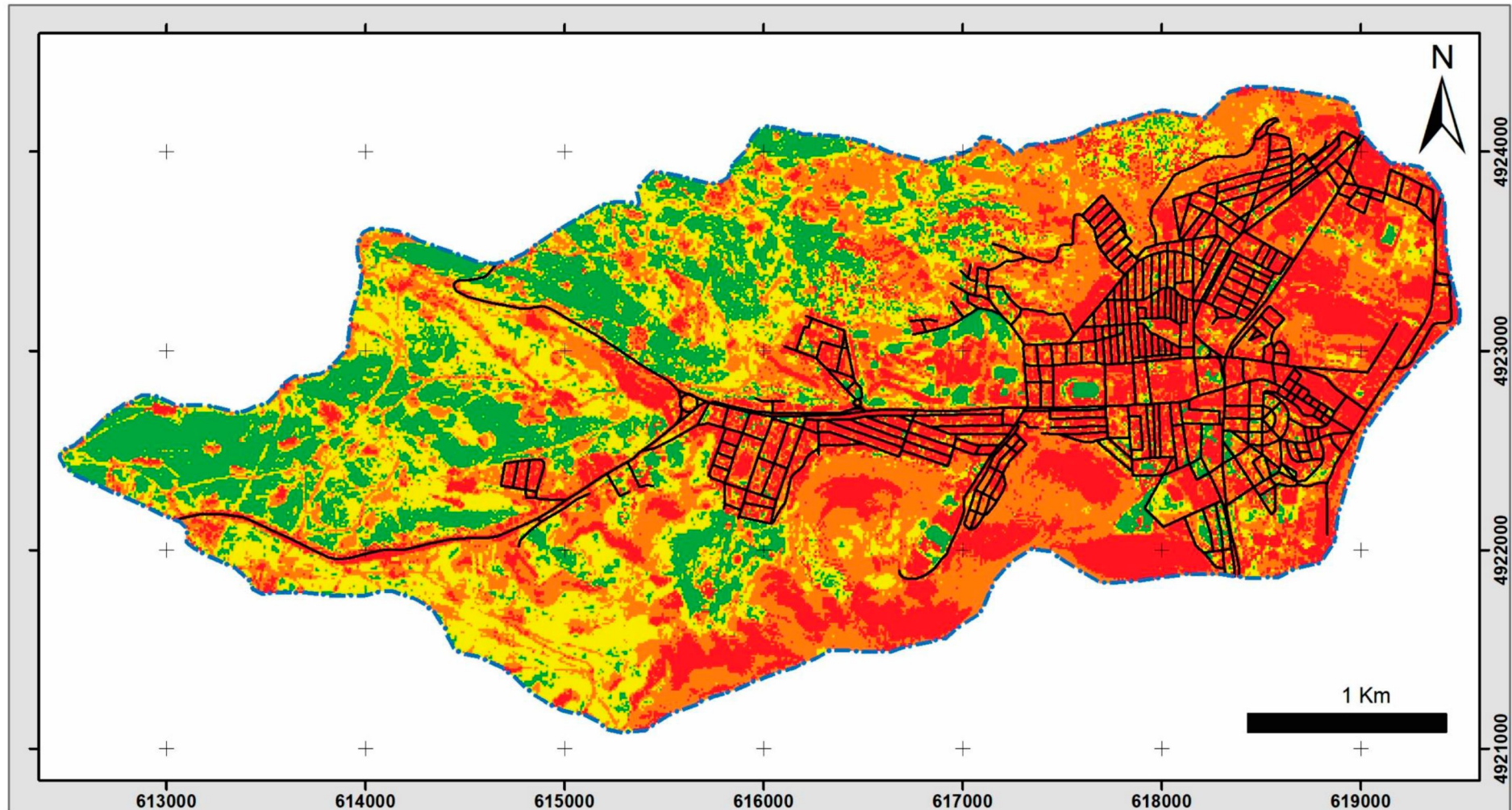


una media a baja peligrosidad, y a medida que la densidad vegetal disminuye, la peligrosidad aumenta, siendo máxima en las zonas con vegetación nula (**Tabla 11**).

| <i>Mapa de Cobertura Vegetal</i> | <i>Factor de influencia o peso x 0,5</i> | |
|----------------------------------|--|-------------------|
| <i>Atributo</i> | <i>Peligrosidad</i> | <i>Valoración</i> |
| <i>Nula</i> | <i>Muy alta</i> | <i>1</i> |
| <i>Baja</i> | <i>Media a alta</i> | <i>3</i> |
| <i>Media</i> | <i>Media</i> | <i>6</i> |
| <i>Alta</i> | <i>Media a baja</i> | <i>7</i> |
| <i>Introducida por el hombre</i> | <i>Media a baja</i> | <i>7</i> |

Tabla 11. Valoración de la cobertura vegetal en función de la peligrosidad geológica que generan.

Mapa de cobertura vegetal de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia
en base a la clasificación supervisada
de imágenes satelitales Sentinel 2.

Autor: Cortés Maximiliano

Figura 43. Mapa de cobertura vegetal.
pág. 87



f) Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales (Fig. 44)

El mapa de procesos antiguos, activos y potenciales surge a partir de la recopilación de antecedentes de la zona de estudio y el mapa de registro de daños aportado por el LabSIG de la UNPSJB. A través de ellos se delimitan secciones de la cuenca con distintas problemáticas.

Uno de los problemas se da por el ingreso de agua y barro en toda la sección baja de la cuenca. Los registros relacionados a inundaciones ocurren en la zona de chacras de Saavedra, barrios Saavedra, Divina Providencia, Sismográfica y Gral. Enrique Mosconi, que se consideran de peligrosidad media a alta (**Tabla 12**). Mientras, el lugar de mayor impacto que abarca toda la extensión de la calle Petrolero San Lorenzo hasta la intersección con la Ruta Nacional N° 3, es de muy alta peligrosidad (**Tabla 12**).

Otra problemática, luego de la tormenta del 2017, es la formación de cárcavas de gran magnitud sobre los sectores bajos de la cuenca de Km. 3 que se ubican sobre la av. Fray Luis Beltrán, calle Petrolero San Lorenzo, el camino que une los barrios Saavedra con Laprida, barrio Extensión de Saavedra, camino a la “Caballeriza”. Estos sectores son valorados como de muy alta peligrosidad (**Tabla 12**).

Las laderas de los cerros Hermitte y Vitteau presentan procesos de remoción en masa, desde pequeños desmoronamientos, luego de intensas lluvias, hasta deslizamientos de grandes masas rocosas. Estos últimos, ubicados en el barrio Extensión de Saavedra, Sismográfica y sector de la Caballeriza, son representados en el mapa de áreas de conflicto con un halo de peligrosidad adicional, para representar las áreas con posibilidad de ser afectadas si el deslizamiento se sigue desarrollando en el futuro. Estas zonas son caracterizadas como de alta a muy alta peligrosidad (**Tabla 12**).

Por último, los barrios Divina Providencia, Sismográfica, Los Tilos y Marquesado presentan distintos inconvenientes sobre sus viviendas como, fractura de paredes, combamiento de medianeras, inclinación de postes de alumbrado público. Estos se deben a movimientos de reacomodación del terreno por diversas causas y se les asigna una peligrosidad media (**Tabla 12**).

| Mapa de sitios de conflicto | Factor de influencia o peso x 5 | |
|--|--|-------------------|
| Atributo | Peligrosidad | Valoración |
| Problemas edilicios (Ped) | <i>Media</i> | 5 |
| Problemas edilicios+deslizamiento (d) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Área próxima a deslizamiento (d) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Cárcavas (C) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Sin registro | <i>Baja a media</i> | 7 |
| Ingreso de agua (Ia)+Problemas edilicios (Ped)+deslizamientos(d)+Cárcavas (C) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Ingreso de agua (Ia)+Problemas edilicios (Ped)+deslizamientos(d) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Ingreso de agua (Ia)+deslizamientos(d) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Inundación (I)+Cárcavas(C) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Inundación (I) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Ingreso de agua (Ia)+Problemas edilicios (Ped) | <i>Media a alta</i> | 4 |
| Ingreso de agua (Ia)+Cárcava(C) | <i>Muy alta</i> | 1 |
| Ingreso de agua (Ia) | <i>Media a alta</i> | 4 |
| Inundación marina (Imar) | <i>Muy alta</i> | 1 |

Tabla 12. Valoración de los sitios de conflicto en función de la peligrosidad geológica que existen.

Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut

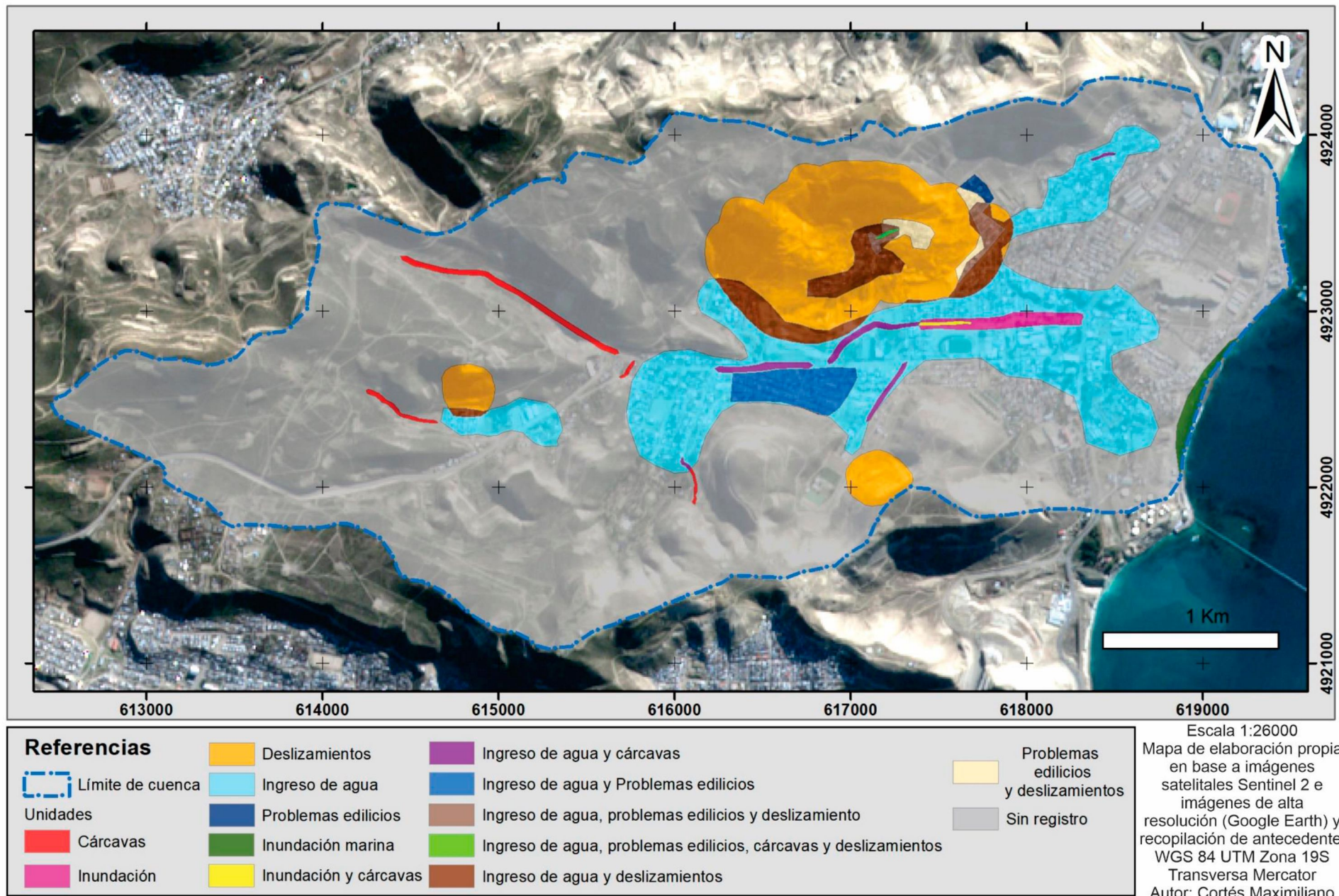


Figura 44. Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales.
pág. 90

7.8. Peligrosidad geológica

Como se mencionó en la sección anterior (7.7. *Mapas temáticos*), el mapa de peligrosidad geológica surge de la combinación de distintas variables ambientales que intervienen en el sitio de estudio, a través de la herramienta Suma Ponderada de ArcGis 10.5, respondiendo a la siguiente suma algebraica:

Peligrosidad Geológica = 5* Mapa Geomorfológico + 5* Mapa de procesos antiguos, activos y potenciales + 4* Mapa de Zona de Influencia Fluvial + 2* Mapa de Pendientes + 1.5* Mapa Geológico + 0.5* Mapa de Cobertura Vegetal

Como resultado se obtiene un Ráster, en el cual, cada uno de sus píxeles son representados por números digitales que se vinculan con la peligrosidad geológica. Estos varían de 18 a 124 y se dividen en cinco clases con sus respectivos límites definidos por el autor (**Fig. 45**) correspondiendo con el grado de peligrosidad que representan:

- Peligrosidad **Muy alta**: 18 a 60
- Peligrosidad **Alta**: 60 a 72
- Peligrosidad **Moderada**: 72 a 89
- Peligrosidad **Baja**: 89 a 111
- Peligrosidad **Muy baja**: 111 a 124

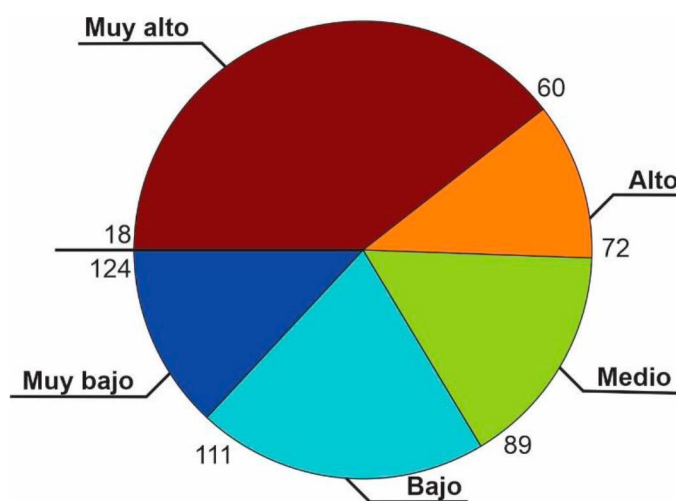


Figura 45. Límites de clases de peligrosidad definidos por el autor.



7.8.1. Mapa de peligrosidad geológica (Fig. 46)

a) Áreas de peligrosidad muy baja a baja

Las áreas de muy baja a baja peligrosidad se encuentran sobre las terrazas estructurales, talud inferior y fondo de valle.

Sobre las terrazas estructurales se presentan materiales resistentes y estables de la Fm. Chenque con pendientes muy suaves y una red de drenaje muy difusa o poco desarrollada, caracterizada principalmente por un flujo no encauzado. La sección baja de la cuenca, compuesta por el talud inferior y fondo de valle presenta una buena estabilidad debido a su baja pendiente (2.5° a 5°), a pesar de que las rocas que las componen (Cuaternarias) se caracterizan por baja litificación y estabilidad frente a esfuerzos. La escorrentía superficial presenta un caudal poco significativo, que se desaloja fácilmente sin generar mayores inconvenientes.

b) Áreas de peligrosidad moderada

Estas áreas se ubican sobre el fondo de valle, talud inferior y medio, y terraza estructural. Sobre el fondo de valle y el talud inferior, las superficies con peligrosidad media se deben a zonas con denuncias de ingreso de agua, presencia de flujos encauzados sobre el área urbana, pendientes mayores de 5° , áreas con problemas edilicios y zonas con posibilidad de ser afectadas por nuevos movimientos de deslizamientos ya existentes. El talud medio presenta laderas conformadas por rocas poco consolidadas y con ángulos entre 10° y 20° , que pueden propiciar procesos de remoción en masa y erosión hídrica, al igual que los bordes de las terrazas estructurales.

c) Áreas de peligrosidad alta

Estas se ubican principalmente sobre el talud medio, talud superior y fondo de valle.

Los taludes medio y superior se caracterizan por superficies con pendiente elevada, mayores a 20° , y por rocas poco consolidadas afectadas por flujos no encauzados durante precipitaciones, dando como resultado faldeos inestables.

El fondo de valle presenta sectores de alta peligrosidad sobre los sitios donde el flujo de agua es encauzado, y sobre todo en cercanía de zonas



inundables, siendo el ejemplo más importante la calle Petrolero San Lorenzo hasta intersección con Ruta Nacional N° 3.

d) Áreas de peligrosidad muy alta

Las áreas de muy alta peligrosidad se ubican sobre los deslizamientos, sistema de drenaje en laderas, cárcavas, zonas inundables y zonas costeras.

Los deslizamientos son procesos de remoción en masa que generan el movimiento de grandes volúmenes de roca, arrastrando todo lo que tengan a su paso. Los sistemas de drenaje sobre taludes incrementan la peligrosidad de estos debido a la existencia de flujo concentrado que provoca erosión en los mismos, propiciando fenómenos de remoción en masa y aporte de gran cantidad de sedimentos a la sección baja de la cuenca.

El desarrollo de cárcavas en zonas urbanas se debe a la combinación de flujos energéticos que escurren por pendientes mayores a 5° sobre terrenos poco consolidados. Asimismo, la concentración de agua sobre el cauce principal y su dificultad para ser drenada genera importantes inundaciones (calle Petrolero San Lorenzo y Ruta Nacional N° 3).

Las zonas costeras se ven afectadas por la acción del oleaje e inundación por mareas, que además pueden causar movimientos de ladera sobre acantilados.

Mapa de peligrosidad geológica de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut.

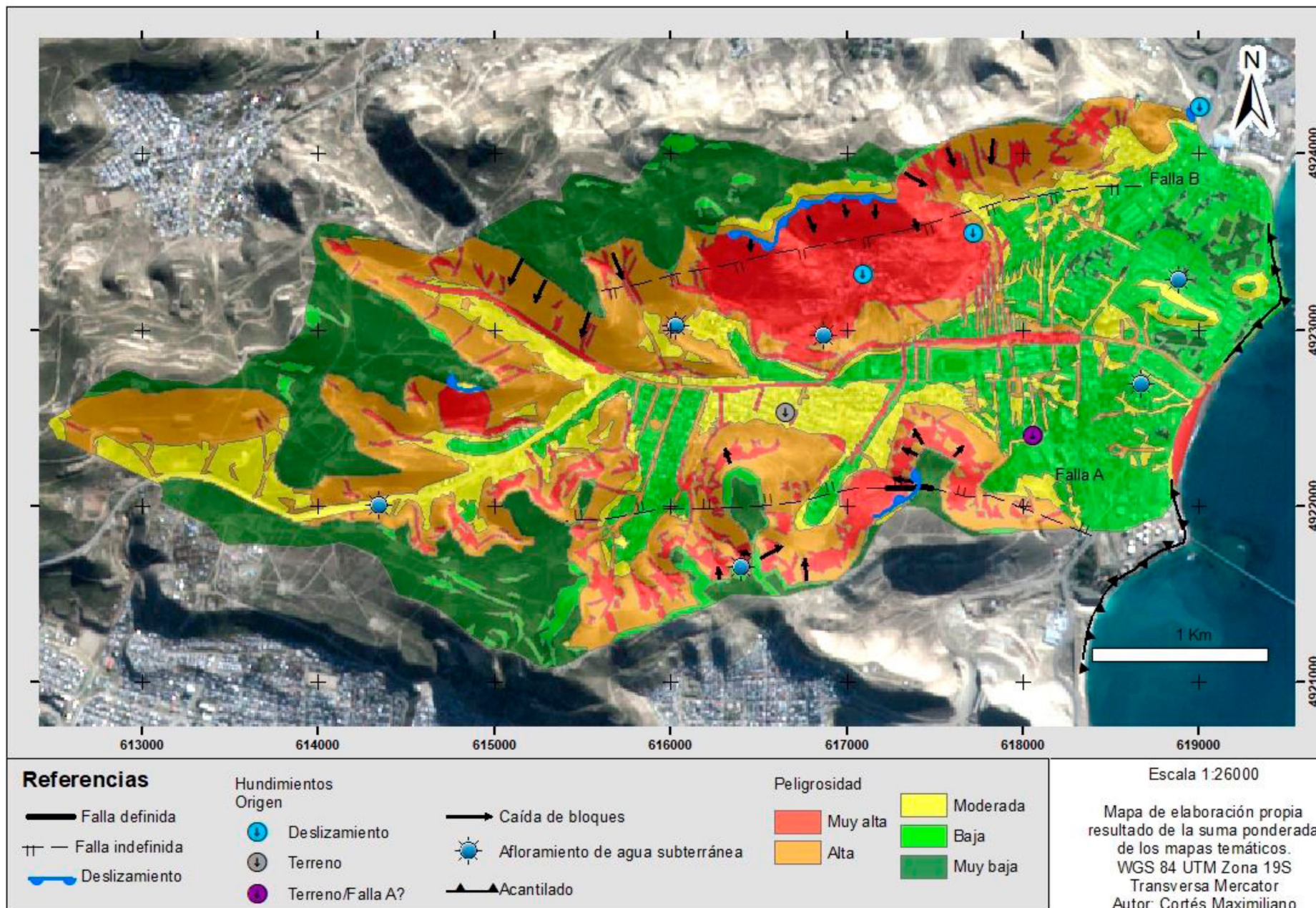


Figura 46. Mapa de peligrosidad geológica.
pág. 94



7.8.2. Procesos geodinámicos externos y su posible recurrencia en el tiempo

Considerando los procesos geodinámicos externos ya descriptos, se establece que los más relevantes dentro de este sector de la ciudad son los de remoción en masa, erosión hídrica y costera, e inundaciones.

El desarrollo de estos se encuentra influenciado, en gran medida, por la presencia de agua. A pesar de que el clima árido – semiárido de la región y el carácter efímero de la cuenca no aporten grandes cantidades de ésta, las precipitaciones de los últimos tiempos, de corta duración y gran intensidad, logran alcanzar el umbral necesario para que estos procesos se desaten. Estas lluvias se suelen dar en los meses de marzo a junio (meses más lluviosos del año) siendo cada vez más recurrentes y agravadas por el cambio climático, que no solo afecta a las precipitaciones, sino también, a un aumento progresivo del nivel del mar. Es decir, la posible ocurrencia de todos estos procesos puede volverse cada vez más frecuente y además potenciada por las modificaciones antrópicas del terreno, como ya se mencionó en capítulos anteriores.

8. DISCUSIÓN

La peligrosidad geológica de la cuenca de Km. 3 está dada por la ocurrencia de fenómenos naturales entre los que se destacan la erosión hídrica, las inundaciones y la remoción en masa. Estos se ven exacerbados no solo por el cambio climático sino también por el aumento de la urbanización sin control y la deficiencia de las obras de infraestructura encargados de atenuarlos.

8.1. Encuestas

Las encuestas realizadas a los vecinos, por sí solas no determinan aspectos técnicos del funcionamiento de la cuenca de drenaje. Sin embargo, las opiniones de quienes habitan este lugar expresan las problemáticas que afrontan diariamente, al igual que lo hace el material recopilado por el LabSIG – UNPSJB. Estos puntos de conflicto son los que deben ser abordados en profundidad desde el punto de vista técnico. Los datos del LabSIG aportan los lugares específicos donde ocurren fenómenos naturales (Ingreso de agua y barro, inundaciones, cárcavas, entre otros) localizados que podrían ser pasados por alto si no se tuvieran. Las encuestas indican que las alertas previas al temporal fueron



insuficientes en comparación con la magnitud del fenómeno, solo la mitad emplea medidas de prevención básicas, y, exponen la preocupación de que el fenómeno vuelva a ocurrir y que las obras para atenuarlo no se realizaron o son escasas, siendo esto parte de los aspectos que se deben evaluar.

8.2. Caracterización del sistema fluvial

El sistema fluvial de la cuenca de estudio se caracteriza por medio de parámetros morfométricos los cuales permiten predecir comportamiento de esta frente a eventos de precipitación (Rai et al., 2019). Los parámetros se calculan a través de Sistemas de Información Geográficos (SIG) considerados altamente precisos y efectivos para tal fin (Singh et al., 2013; Rai et al., 2014; Waikar y Nilawar, 2014; Rai et al., 2019). Entre los parámetros utilizados, la relación de elongación (0.69) indica que la cuenca tiene una morfología circular levemente alargada. Campos Aranda (1998) considera que este valor se asocia a relieves fuertes y pendientes elevadas. Esta tendencia a la circularidad también está dada en los índices de circularidad (0.52) y de gravelius (1.38). Camino et al. (2018) relaciona esta morfología a la incapacidad para atenuar crecidas debido a la equidistancia de los puntos de la divisoria de agua hacia el centro de cuenca, lo que genera una reducción en el tiempo de concentración. La densidad de drenaje resultante (5.6 km/km^2) se relaciona a sistemas de drenajes con pendientes elevadas y rocas impermeables (Horton, 1932). Melton (1957) coincide con esto último y agrega que, debido a la baja tasa de infiltración, también justificada por la infiltración relativa alta ($213.86 \text{ cauces/km}^3$), se generan escorrentías superficiales importantes y erosión. Valores altos de frecuencia fluvial como los hallados ($38.19 \text{ cauces/km}^2$) se vinculan a la posible ocurrencia de *flash flood* según Romshoo et al. (2012). Estos resultados elevados de densidad de drenaje y frecuencia fluvial hacen que el flujo no encauzado sea reducido (0.089), lo que significa que el flujo de agua se encauce rápidamente y que disminuya el tiempo que toma en alcanzar el punto de descarga (Romshoo et al., 2012), mientras que Samal et al. (2014) los asocia a un relieve alto de pendientes empinadas. La relación de bifurcación entre los cursos de orden 4 y 5 ($R_b=6$) implica el potencial desarrollo de *flash flood* durante tormentas, por lo que se incrementa la vulnerabilidad de la cuenca a las inundaciones (Rakesh et al., 2000, citado por Romshoo et al., 2012). Además,



supone una alta influencia de estructuras y baja permeabilidad del sustrato (Reddy et al., 2004), que en este caso se da por la urbanización. Tanto los valores de número de rugosidad (2.02) como la relación de relieve (60.2) indican una tendencia a la erosión de suelos y un hidrograma caracterizado por una crecida muy brusca (Reddy et al., 2004; Samal et al., 2014).

Estas interpretaciones establecen que la mayor problemática en la cuenca de Km. 3 ocurre debido a la generación de un elevado volumen de escorrentía superficial que recorre el sistema fluvial a alta velocidad con la capacidad de erosionar suelos y que se caracterizan por un tiempo de concentración corto. Todos estos factores se derivan en el aumento de la vulnerabilidad al desarrollo de inundaciones de tipo *flash flood* durante eventos de precipitación. Esto concuerda con los hallazgos de Paredes et al. (2017, 2020, 2021) y Paredes y Ocampo (2019) en el que se establece que la inundación de 2017 en la cuenca de Km. 3 fue de tipo *flash flood* y que su tiempo de concentración fue extremadamente corto en comparación con las otras cuencas de Comodoro Rivadavia, el cual rondó los 23 minutos. Estas características presentan una peligrosidad elevada, ya que los flujos recorren la cuenca en pocos minutos, restringiendo la posibilidad de la población a reaccionar (evacuarse). Por otra parte, la velocidad de flujo cuenta con la capacidad de erosionar suelos en áreas urbanizadas, de arrastrar personas u objetos, y, además, de provocar inundaciones rápidamente. A esto se le suma la ausencia, cuando ocurrió la tormenta y actualmente, de obras estructurales que permitan controlar el volumen y la velocidad de la escorrentía superficial que llega a la descarga. Esta problemática se podría atenuar con piletas de retención en las subcuencas que aporten mayor cantidad de escorrentía, mediante la interposición de un sistema de diques de retención o de obstáculo en tributarios, a fin de reducir la velocidad del flujo, el caudal máximo y el transporte de sedimentos.

Retomando los datos de los parámetros morfométricos, los que refieren a los índices influenciados por las propiedades de la red de drenaje (densidad de drenaje, longitud total de cauces, número de cauces y frecuencia fluvial; ver **Tabla 13**) difieren respecto a los presentados en Paredes et al. (2017, 2020, 2021) y Ocampo y Paredes (2019), para la misma cuenca de estudio. Esto se debe a que los parámetros dependen necesariamente de la escala de trabajo (Melton, 1957; Gil, Volonté y Campo, 2019). En el presente trabajo se focaliza

sobre la cuenca de Km. 3 a una escala local y de detalle mientras que los autores previos abarcan el estudio de todas las cuencas de la ciudad de Comodoro Rivadavia a escala regional. Otra de las causas de esta diferencia puede darse por la utilización de imágenes satelitales o modelos de elevación digital con distintas resoluciones espaciales (García et al., 2002) o por la metodología aplicada al mapear la red de drenaje, de forma manual o automática.

| Parámetros morfométricos | Paredes et al. (2017, 2020, 2021); Ocampo y Paredes (2019); | Cortés (2022) |
|--------------------------|--|------------------------------|
| Índice de Gravelius | 1.3 | 1.38 |
| Índice de circularidad | 0.59 | 0.52 |
| Longitud total de cauces | 18.01 km | 74.94 km |
| Densidad de drenaje | 1.5 km/km ² | 5.6 km/km ² |
| Número de cauces | 20 | 511 |
| Frecuencia fluvial | 1.67 cauces/km ² | 38.19 cauces/km ² |

Tabla 13. Comparación de parámetros morfométricos.

En función de lo antes mencionado, la comparación de datos morfométricos de una misma área de estudio, pero de distintas investigaciones y autores, no es lo más apropiado. Sin embargo, si se analizan los resultados de Paredes et al. (2017, 2020, 2021) y Ocampo y Paredes (2019) de la cuenca de Km. 3 con respecto a las demás cuencas abordadas en estas publicaciones (Cañadón Biggs, Caleta Córdoba, Arroyo Km. 8, Arroyo Belgrano, Arroyo La Quinta, Arroyo La Mata), se muestra que la cuenca de Km. 3 es de las más pequeñas (12 km²). A pesar de esto, su cauce principal posee la mayor pendiente (0.0371 m/m) y un tiempo de concentración extremadamente corto (23.22 min). El índice de circularidad de Km. 3 es el mayor (0.59) e indica que es la que más tiende a la circularidad, mientras que el Cañadón Biggs (0.13) representa la cuenca más alargada. En el caso del coeficiente de compacidad, el de la cuenca de Km. 3 es el menor de todos (1.38). Sin embargo, tiene el mismo significado que el índice de circularidad. La densidad de drenaje se mantiene sin grandes variaciones entre valores de 1 y 2 Km/Km² para todas las cuencas, al igual que la frecuencia fluvial (ver **Tabla 14**). A pesar de las diferencias sobre algunos de los parámetros (entre estos trabajos y la presente tesina) existe una concordancia en las tendencias e interpretaciones sobre el comportamiento de la cuenca de Km. 3. Asimismo, y no menos importante, la comparación de las cuencas de drenaje de Comodoro Rivadavia revela que la cuenca de Km. 3 es una de las más problemáticas en lo que respecta al comportamiento hidrológico

y esto es de sumo interés a la hora de decidir sobre cuáles de los sistemas de drenaje se va a priorizar la toma de medidas de mitigación.

| Parámetro morfométrico | Biggs | Caleta Córdoba | Km. 8 | Belgrano | Km. 3 | De La Quinta | La Mata |
|--|--------|----------------|--------|----------|--------|--------------|---------|
| Área (km ²) | 65 | 6 | 349 | 462 | 12 | 67 | 586 |
| Longitud del cauce ppal. (km) | 24.2 | 5.6 | 40.3 | 48.4 | 6.3 | 22.8 | 56 |
| Pendiente prom. (m/m) | 0.0152 | 0.0027 | 0.0166 | 0.0147 | 0.0371 | 0.0279 | 0.0130 |
| Índice de gravelius | 2.8 | 2.3 | 1.72 | 1.84 | 1.3 | 1.89 | 1.81 |
| Índice de circularidad | 0.13 | 0.19 | 0.34 | 0.3 | 0.59 | 0.28 | 0.31 |
| Densidad de drenaje (km/km ²) | 1.74 | 1.66 | 1.71 | 1.61 | 1.5 | 1.67 | 1.61 |
| Frecuencia de cauces (cauces/km ²) | 1.83 | 1.5 | 1.66 | 1.73 | 1.67 | 1.75 | 1.75 |
| Tiempo de concentración (min) | 230.58 | 144.85 | 330.21 | 398.34 | 23.22 | 174.6 | 467.41 |

Tabla 14. Parámetros morfométricos de las cuencas de drenaje de Comodoro Rivadavia (Cañadón Biggs, Caleta Córdoba, Arroyo Km. 8, Arroyo Belgrano, Arroyo La Quinta, Arroyo La Mata). Tomado de Paredes et al. (2017, 2020, 2021) y Ocampo y Paredes (2019).

8.2. Efecto de la urbanización

El área ocupada por la urbanización/antropización sobre la cuenca de Km. 3 actualmente alcanza un valor de 48%, es decir, casi la mitad de su superficie presenta algún tipo de intervención humana. Respecto a esto, se analiza si existe variación de los parámetros morfométricos entre los años 1970 y 2021. Frente a esto existe una limitación al realizar el mapeo del sistema de drenaje sobre una fotografía aérea de 1970 del IGM, la cual fue digitalizada y cargada en un SIG, ya que no presenta la misma calidad que una imagen satelital de Google Earth™ y por este motivo se pierde información. No obstante, para el período 1970 – 2021 se obtiene un aumento del 74% en el número de cauces, de 23% en la densidad de drenaje, de 62% en la frecuencia fluvial, de 99% en la infiltración relativa, de 14% en la relación de bifurcación y el flujo no encauzado se reduce un 20%. Dicho de otra manera, la ampliación de superficies impermeabilizadas por el avance de la urbanización por un lado genera que las cuencas de drenaje tengan mayor eficiencia para desalojar el agua (Doyle et al., 2000; Gholami et



al., 2010), pero también se encarga de desarrollar mayores volúmenes de escurrimiento superficial, debido a la imposibilidad de infiltración, y por ende, caudales máximos mayores con tiempos de concentración cortos (Campana y Tucci, 2001; Liu et al., 2005; Zhang y Shuster, 2014; El Alfy, 2016; Paredes et al., 2017) que incrementan la susceptibilidad a inundaciones (Liu et al., 2004). Además, las cuencas fluviales de pequeñas dimensiones densamente urbanizadas son más afectadas por la escorrentía que las cuencas de mayor tamaño (Maksimovic y Tucci, 2001, como citó Gholami et al., 2010). Los taludes de los cerros Vitteau y Hermitte se encuentra afectados mayormente por caminos y locaciones petroleras que generan superficies sobre los pendientes desprovistos de vegetación. El suelo desprotegido contribuye al desarrollo de escorrentía superficial, lo expone a la erosión y a raíz de esto, genera un importante volumen de sedimentos capaz de obstruir pluviales artificiales y provocar inundaciones (Paredes et al., 2017, 2020, 2021; Ocampo et al., 2019). Esto último expresa la peligrosidad que implica la desprotección del sustrato, por lo que es necesario considerar revegetar las áreas que no se encuentren en actual uso por las actividades extractivas a fin de aumentar la infiltración y, por ende, minimizar la escorrentía superficial y el volumen de sedimentos erosionados.

8.3. Estimaciones de caudal

Las cuencas de drenaje de Comodoro Rivadavia se caracterizan por ser sistemas fluviales efímeros, propios de zonas áridas a hiper-áridas, en las cuales existen grandes períodos secos, interrumpidos por precipitaciones intensas que generan inundaciones con altos picos de descarga acuosa y condiciones de alto régimen de flujo (Paredes et al., 2017, 2020, 2021; Ocampo y Paredes, 2019). Estos sistemas no cuentan con ninguna estación de aforo. En general, la deficiencia de datos hidrológicos se debe a las dificultades técnicas para determinar el caudal en canales efímeros, su bajo interés económico y baja frecuencia en que los canales llevan agua (Paredes et al., 2017). Las aproximaciones de caudal para la tormenta ocurrida entre los días 29 y 31 de 2017 dan como resultado valores entre 22.54 y 41.9 m³/s. Estos caudales se estiman mediante la ecuación de continuidad, el método SCS CN y el *software* HEC-HMS 4.5. La ecuación de continuidad ($Q=A*v$), también aplicada en los



trabajos de Foix et al. (2017) y Paredes et al. (2017, 2020, 2021), utiliza datos reales tomados en campo y de fotografías y videos de la tormenta, lo que implica una menor incertidumbre respecto a las simulaciones realizadas por los demás métodos. Sin embargo, la determinación del área presenta dificultades a la hora de su medición por las irregularidades del terreno, como así también, para precisar la altura máxima a la que llegó el agua. Variaciones del orden de los centímetros generan importantes cambios en el área calculada y, por consiguiente, sobre el caudal. El método de la SCS se considera uno de los cálculos más usados para la predicción de escorrentía superficial debido a su simplicidad, facilidad y estabilidad, pudiendo ser aplicado a cuencas pequeñas sin mediciones en zonas áridas a semiáridas y con usos de suelos relacionados a agricultura, forestal y urbano (Mishra y Singh, 2003; Xiao et al., 2011; El Hames, 2012; Satheeshkumar et al., 2017). El programa HEC-HMS 4.5 utiliza el método de transformación y pérdida de la SCS CN con su respectivo hidrograma unitario. Este software es aplicado a un amplio rango de áreas geográficas con climas húmedos, tropicales y áridos (Abushandi y Merkel, 2013), incluyendo las que presentan urbanización (El Alfy, 2016). Uno de los mayores inconvenientes sobre estas simulaciones (SCS CN y HEC-HMS 4.5) es la necesidad de calibrar y validar el modelo para su ajuste mediante la comparación con cuencas cercanas, con características similares y con aforo, lo cual no fue posible de realizar, por lo que los caudales hallados presentan cierto grado de incertidumbre.

El valor de Curva Número (CN) de la cuenca de Km. 3 (82.99) indica que las superficies de la cuenca presentan una baja infiltración y por ende un mayor volumen de escorrentía, en coincidencia con las interpretaciones de los parámetros morfométricos. De los caudales estimados el método de la ecuación de continuidad y de la SCS CN son similares (22.54 m³/s y 25.21 m³/s, respectivamente), por lo que se consideran valores subestimados teniendo en cuenta que el de la ecuación de continuidad se calculó para el momento en que iniciaba la tormenta (29 de marzo de 2017 a las 18:09 pm) y que la mayor cantidad de milímetros precipitados se dio el día 31 de marzo de 2017 a las 4:10 am, es por esto que se considera el valor de 41.9 m³/s (método de HEC HMS 4.5) como el más representativo.



Paredes et al. (2020, 2021) estiman que el caudal desarrollado en la cuenca de Km. 3, en 2017, es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual difiere en gran medida con los calculados en la presente investigación. Este valor ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) se halla al considerar la relación de proporción entre el área de una cuenca y la descarga acuosa (ver Galster et al., 2006). En este caso se utiliza el caudal calculado en el arroyo Belgrano (Área = 462 km^2 ; $Q = 193 \text{ m}^3/\text{s}$), ubicado a pocos kilómetros de la cuenca de Km. 3, para la misma tormenta y se extrapola a la cuenca de estudio asumiendo condiciones similares de precipitación y escorrentía (Foix et al., 2017; Paredes et al., 2017, 2020, 2021). Galster et al. (2006) argumenta que esta proporcionalidad (entre el área y el caudal) no se mantiene cuando la cuenca de drenaje presenta un área importante ocupada por superficies impermeables. Esto se observa al comparar el porcentaje de suelo desnudo de la cuenca de estudio (48%) y la del arroyo Belgrano (14%; ver Paredes et al., 2017). Asimismo, la diferencia entre los parámetros morfométricos entre ambos sistemas de drenaje (cuenca de Km. 3 y de arroyo Belgrano) también pueden ser la causa de que la proporcionalidad no sea directa.

8.4. Procesos geodinámicos externos

Cárcavas: La erosión hídrica es uno de los mayores problemas que afronta la cuenca de Km. 3, sobre todo producto del temporal. La formación de las cárcavas está influenciada por las características de los suelos, la cobertura vegetal, el uso de los suelos y el poder erosivo del agua (Argüelo y Sanabria, 2004), factores que convergen en la zona de estudio ya que la mayoría se las encuentra sobre taludes empinados y fuertemente asociadas a superficies con suelos friables desprovistas de vegetación por la ocupación de las actividades hidrocarburíferas de la región (camino y locaciones) y loteo de viviendas. Numerosos autores indican que existe una relación entre la aparición de las cárcavas y el crecimiento de áreas antropizadas vinculadas a caminos y plataformas en laderas (Moeyersons, 1991; Burkard y Kostaschuk, 1995; Nyssen et al., 2002; Seutloali et al., 2015), donde los efectos más severos se deben al crecimiento del área de drenaje resultante de la construcción de caminos, las pendientes empinadas y la falta de cobertura vegetal (Seutloali et al., 2015). González (2017) menciona que las cárcavas de Comodoro Rivadavia que tienen mayor longitud y pendiente se asocian a caminos sobre taludes a causa de la colección de agua de cuencas



superiores, en concordancia con lo establecido por Seutloali et al. (2015). Normalmente el crecimiento de las cárcavas ocurre por la retracción de su cabecera, pero en las plataformas (o locaciones) ubicadas sobre laderas empinadas la erosión comienza en el borde superior de la locación y avanza pendiente abajo sin grandes modificaciones por erosión en la cabecera (Moeyersons, 1991). En Comodoro Rivadavia, siendo esta una ciudad netamente petrolera, no existe ningún protocolo para la construcción de sus locaciones, solo existe una normativa provincial que limita el movimiento de suelos en taludes a un máximo de 25000 m³. La erosión de estas implica un importante volumen de sedimentos que alcanzan la urbanización provocando la reducción de la profundidad de los canales, la pérdida de eficiencia de obras hidráulicas, la retención de contaminantes, la degradación de suelos (Ogura y Soares Macedo, 2005) y soterramiento de zonas urbanas que finalmente puede resultar en inundaciones, y por ende una elevada peligrosidad.

En general, las cárcavas preexistentes a la tormenta aumentaron sus dimensiones después de ella unas decenas a centenas de metros en longitud y algunos pares de metros en el ancho. Para que esto suceda todo el material erosionado debe ser evacuado (Kirkby y Bracken, 2009). Las que surgieron durante la tormenta presentan distintos patrones, algunas son más profundas que anchas, como de los caminos a la “Caballeriza” y el que une los barrios Saavedra y Laprida, mientras que las de la avenida Fray Luis Beltrán y la calle Petrolero San Lorenzo, son más anchas que profundas. En las primeras la tasa de incisión es mayor que la de retracción de sus paredes, sin embargo, donde se acumulan bloques caídos la tasa de incisión se reduce. En la segunda, *a priori* parece que la tasa de retracción de sus paredes es mayor que la de incisión, pero aquí los bloques de pavimento tapizan la base de la cárcava lo que hace que se evite la erosión vertical (ver Kirkby y Bracken, 2009).

Las cárcavas más importantes son las que se desarrollaron en 2017 en la zona baja de cuenca de Km. 3 (av. Fray Luis Beltrán frente a barrio Médanos, camino a la “Caballeriza” y calle Petrolero San Lorenzo) debido a su cercanía con la urbanización y la afección de algunos de los servicios públicos. La fotografía aérea de 1970 evidencia la presencia de grandes cárcavas que coinciden en ubicación con las antes mencionadas (desarrolladas en tormenta



de 2017), lo que indica que históricamente la erosión predomina en estos sectores por la concentración de flujo, su velocidad alta y la desprotección de los suelos que, con el avance de la urbanización a lo largo de los años, estos factores se ven acrecentados. A estos últimos se le suma la posibilidad que por el desbordamiento de los pluviales subterráneos se produzcan filtraciones que humectan el terreno en profundidad y que favorecen la erosión, aunque no es posible comprobarlo fácilmente. Por otra parte, una vez que la incisión profundiza en el terreno y encuentra ductos de algún servicio, el material granular con menor compactación que los rodea se erosiona, ya que el flujo de agua al circular sobre las paredes de las cañerías de baja rugosidad aumenta su poder erosivo, algo similar a lo que ocurre con el escurrimiento superficial cuando pasa de una calle pavimentada/asfaltada a sus banquetas, lo que provoca una mayor profundidad de la cárcava con respecto a la posición original de los ductos.

Estos puntos conflictivos dentro de la cuenca aún no han sido abordados puesto que, actualmente, la av. Fray Luis Beltrán ha sido rellenada y asfaltada de manera muy similar a como se encontraba antes de la tormenta de 2017 con un canal de drenaje sin revestimiento a uno de sus lados (susceptible a la erosión) (**Fig. 47a**). Lo mismo sucede con el camino a la “Caballeriza” (**Fig. 47c**) y la calle Petrolero San Lorenzo (**Fig. 47b**), las cuales solo fueron rellenadas y cubiertas con una mezcla de grava y arena. Esta última calle no presenta asfalto/pavimento como si lo hacía previo al temporal, lo que implica una mayor susceptibilidad a la erosión y, por consecuencia, una fuente de provisión de sedimentos. Es decir, sobre lo mencionado, la situación es similar o peor a la del año 2017 si ocurre un fenómeno de la misma naturaleza, lo que implica una peligrosidad elevada.



Figura 47. a) Relleno y asfalto de la cárcava de la avenida Fray Luis Beltrán. b) Relleno de la cárcava de la calle Petrolero San Lorenzo. c) Relleno de la cárcava del camino a la “Caballeriza”.

En base a esto, existe una necesidad de disminuir la escorrentía superficial, su velocidad, la desprotección de los suelos y la provisión de sedimentos a través de sistemas de diques de obstáculo en cárcavas de la zona alta, piletas o diques de decantación, revegetación de caminos y locaciones que se encuentren fuera de uso y el empleo de protocolos de construcción para estas últimas, teniendo en cuenta el volumen de movimientos de suelo sobre laderas empinadas, la revegetación de sus taludes y pendientes, y la implementación de sistemas de drenajes que evacuen o redirección el agua fuera de las plataformas petroleras sin provocar daños por carcavamiento aguas abajo. Las cárcavas ya establecidas pueden ser revegetadas con especies que se caractericen por generar sistemas radiculares profundos a fin de mejorar la resistencia del suelo, disminuir la velocidad del flujo de agua y retener sedimentos (Poesen et al., 2003) que puede combinarse con una desviación de la escorrentía de la cabecera de las cárcavas y bordes de talud mediante zanjas (González, 2017). Los sitios en la cuenca donde se registran cárcavas en zonas urbanas deben ser protegidos de la erosión evitando la existencia de banquetas o superficies cercanas sin ningún tipo de recubrimiento (hormigón). El flujo de agua debe ir encajonado sobre las avenidas o calles sin la posibilidad de desencauzarse a zonas susceptibles a la erosión mediante estructuras de contención a los lados, simulando la sección transversal de un cauce trapezoidal o rectangular.

Inundación: En 2017, la cuenca de análisis se vio afectada por precipitaciones abundantes sobre suelos de baja permeabilidad con laderas de pendientes altas y escasa vegetación, y en un sistema de drenaje que tiende a la circularidad. Estos factores coinciden con las características de las inundaciones de tipo *flash*



flood mencionadas por Crichton (2008) y Diez et al. (2009) a lo que Paredes et al. (2017) agregan que la saturación del suelo o la excedencia de su capacidad de infiltración también es fundamental en este proceso, lo cual concuerda con la humectación de los suelos por las precipitaciones días antes del temporal. Otra de las causas de la inundación se vincula con la eficiencia de los pluviales subterráneos para drenar la escorrentía superficial. El valor aproximado de escorrentía varía entre 22.54 y 41.9 m³/s y la capacidad máxima de los desagües es de 6.18 m³/s, para el que se encuentra debajo de la calle Petrolero San Lorenzo, y de 70 m³/s, para el que se extiende desde la Ruta Nacional N° 3 hasta la descarga en el mar. Es decir, que el primer pluvial se ve sobrepasado, ya que el caudal estimado mediante la ecuación de continuidad casi al inicio de la calle Petrolero San Lorenzo (Q=22.54 m³/s a las 18 horas del día 29 de marzo de 2017) supera ampliamente la capacidad del sistema de desagüe, el cual también se vio afectado por la colmatación de la pileta de decantación. Esto resulta en un importante volumen de escorrentía que debe drenar superficialmente. Respecto al segundo pluvial subterráneo, sus características permiten evacuar un gran volumen de agua sin problemas. Sin embargo, la capacidad de desagote de su alcantarilla es la que limitó el ingreso de agua debido a que, iniciada la tormenta, rápidamente se obstruyó con basura y un vehículo, producto del arrastre del escurrimiento superficial. No menos importante es la ubicación de la Ruta Nacional N° 3 de forma transversal al flujo y sobreelevada aproximadamente 2.2 m sobre dicha alcantarilla. Esto representa una situación de alta peligrosidad ya que, al impedirse el ingreso del agua al pluvial, esta se acumula hasta la altura de la ruta y se produce la depositación de la carga sedimentaria por la disminución de la velocidad de flujo. Esta situación se agrava aún más por la presencia de una estación de servicio a tan solo 50 m de la alcantarilla, lo que genera la posibilidad que se produzca una contaminación del flujo de agua con combustibles por la inundación en este sector. Estos últimos pueden dispersarse en la zona inundada y migrar aguas abajo hasta su descarga hacia el mar, contaminando el ambiente y afectando la salud de quienes habitan este lugar.

Respecto a las posibles soluciones a esta problemática y reducción de la peligrosidad, Paredes et al. (2017) plantean la implementación de sistemas de drenaje superficiales, evitando de esta manera las entubaciones. Estos



presentan una ventaja por la facilidad de mantenimiento y limpieza, y, además, el inconveniente que se genera por un mal diseño de alcantarillas o por su obstrucción se ve minimizado, ya que el flujo de agua puede ingresar por la superficie. Ahora bien, esto implica el rediseño de toda la zona baja de la cuenca y el costo que eso conlleva. Otra posibilidad es mantener el pluvial subterráneo al este de la Ruta Nacional N° 3 y redimensionar el de la calle Petrolero San Lorenzo, sin embargo, es necesario que las alcantarillas sean acordes a las dimensiones del pluvial. Si bien no se realiza una evaluación del sistema de alcantarillas en el presente trabajo porque escapa a los objetivos de la tesis, se entiende que estas son un limitante de la capacidad de drenaje del pluvial y más aún si se encuentran obstruidas. Otra posibilidad es descentralizar el flujo de agua del centro de la cuenca a través de pluviales de menor envergadura paralelos a los cerros circundantes, los cuales captan su escorrentía y la descargan al mar individualmente. Asimismo, es necesario controlar la cantidad de sedimentos que llegan a este sector para evitar reducir la capacidad de los pluviales. También es imprescindible implementar sistemas de alerta temprana, planes de evacuación y mejorar los avisos previos a la tormenta al igual que las medidas de prevención. La pileta de decantación al inicio de la calle Petrolero San Lorenzo debe ser puesta en servicio nuevamente y complementada con otras piletas dispuestas inmediatamente por debajo de los taludes con sistemas de canales de resguardo que capten su escorrentía.

Asentamientos de terreno: El barrio Divina Providencia presenta en numerosas viviendas una serie de patologías representadas por fracturas. La existencia de cárcavas previas al emplazamiento del barrio y su posterior relleno es uno de los factores contemplados como causa de los movimientos del terreno, que inevitablemente trae consecuencias sobre las estructuras rígidas. Tchilinguirian (2003) descarta que esto sea producto de procesos de remoción en masa y plantea que los daños se asocian a procesos de *piping*, deslizamientos de taludes de relleno de fondo de lotes y pérdida de la capacidad portante del material ante un incremento de humedad, en los cuales, en todos ellos la infiltración de agua es el principal disparador. También considera que los materiales utilizados como relleno presentan propiedades macroscópicas que muestran elevada susceptibilidad a la consolidación, al asentamiento diferencial



y al desarrollo de *piping*. Vidal (2018) al igual que Tchilinguirian (2003) hace énfasis sobre las propiedades de los suelos donde destaca la falta de consolidación natural, su humedad por debajo del límite de contracción (el ingreso de agua posibilita el cambio de volumen del suelo), la presencia de erosión en tubificación o *piping* (el colapso de estas genera asentamiento), asentamiento diferencial debido a variación del espesor de suelos sin consolidación y reptaje. La proximidad a la supuesta traza de la falla A (**Fig. 46**) hace pensar que tenga alguna influencia sobre los movimientos de terreno, sin embargo, Vidal (2018) desestima su vinculación, pero si menciona que existe una posible estructuración del terreno por agrietamiento y fracturamiento relacionados a la falla A. Esta situación representa una peligrosidad media o moderada ya que los movimientos de terreno se dan de manera casi imperceptible pero que con el paso del tiempo puede generar roturas no solo en las estructuras de las viviendas sino también sobre las cañerías de agua, gas y cloacas. La adición de agua a los suelos acelera los procesos antes mencionados y las pérdidas de gas pueden ocasionar explosiones. Ante esto, es necesario reducir al mínimo la incorporación de agua al sustrato, desviar la escorrentía generada por precipitaciones en la totalidad del barrio, deprimir el nivel freático (si es necesario) y monitorear los movimientos a través de puntos de control. Respecto a los asentamientos que provocan continuamente daños sobre las viviendas es imprescindible hallar un sustrato en profundidad que tenga la capacidad portante necesaria para utilizar de fundación y recalzarlas.

Remoción en masa: Sobre las laderas de los cerros de la cuenca de Km. 3 se encuentran procesos de remoción en masa entre los que se destacan los deslizamientos, caída de bloques y flujos de barro y detritos. El deslizamiento del barrio Sismográfica que según González et al. (2002) corresponde a un movimiento de expansión lateral producto de la licuefacción del material que subyace la superficie, lo atribuyen a la presencia de factores condicionantes como las pendientes altas, la menor insolación por lo que se retiene mayor humedad, la presencia de arcillas de elevada plasticidad que facilitan el despegue y el movimiento, la disposición subhorizontal de los estratos que favorece la constitución de superficies de patinaje (subhorizontal) coincidentes con los bancos arcillosos y la presencia de falla normal "B" (**Fig. 46**) y sus fallas



auxiliares, mientras que entre los factores desencadenantes no descartan que se deba a un reajuste estructural de las fallas aunque estiman que es más probable que el movimiento se desate por la infiltración de agua a través de ellas. Otra de las posibilidades que menciona son las actividades antrópicas relacionadas a la explotación petrolera en el cual se modifica la pendiente natural y se realizan perforaciones de pozos petroleros. A diferencia de González et al. (2002), Hirtz (2003) y Vidal (2018) lo consideran al movimiento de ladera de Sismográfica como un deslizamiento de tipo rotacional. Las viviendas del barrio Sismográfica presentan daños observables principalmente por fracturas, similar al caso del barrio Divina Providencia, pero aquí los motivos se vinculan según Vidal (2018) al asentamiento del barrio sobre un deslizamiento de tipo rotacional con el desarrollo de una cresta de presión urbanizada, la presencia de *piping*, el reptaje del suelo asociado al deslizamiento y al comportamiento plástico por exceso de humedad y el ingreso de agua a través de fracturas subverticales en el terreno que humectan la masa deslizada. Esta última genera un empuje sobre estos sectores estimulado por la generación de bermas en la pendiente (para construcción de viviendas), adición de peso por relleno y pérdidas de agua por rotura de cañerías, siendo este último factor el cual provoca una aceleración de los movimientos (Hirtz, 2003). Todos estos autores coinciden en que el ingreso de agua a la masa rocosa es el disparador del movimiento del terreno. El deslizamiento que ese encuentra a pocos metros del camino a la “Caballeriza” es un claro ejemplo de ello, el cual se desencadenó en pocos días durante las lluvias de 2017. Vidal y Hirtz (2017) y Vidal (2018) expresan que este movimiento de ladera es condicionado por la presencia de arcillas alteradas con un diaclasamiento paralelo a la pendiente que, en conjunto con el agua infiltrada provocaron las condiciones necesarias para que el terreno deslice, y anticipan que existe una alta probabilidad de que se amplie hacia las cabeceras y a los laterales. Este movimiento lo caracterizan como un deslizamiento de tipo combinado traslacional – rotacional (Vidal y Hirtz, 2017; Vidal, 2018). Existen otros deslizamientos ubicados en el barrio Extensión de Saavedra y Km. 4, también señalados en Ocampo et al. (2019). El primero de estos se presenta sobre una ladera empinada con abundante vegetación por lo que la retención de humedad en el suelo y el emplazamiento de caminos y locaciones son algunos factores que pueden propiciar el movimiento. A esta situación se le suma la



excavación al pie de la ladera por el emplazamiento de un barrio residencial la cual es considerado como un factor que provoca inestabilización de la ladera (González de Vallejo, 2002), algo similar a lo que ocurre con el deslizamiento del barrio Km. 4 por el emplazamiento de la Ruta Nacional N° 3.

La caída de bloques en los cerros de la cuenca de Km. 3 está vinculada principalmente a la presencia de bancos de coquinas de la Fm. Chenque sobre los sectores altos. Su movimiento se da gravitacionalmente por la pérdida de sustento en la base de las rocas, aunque también puede ser desencadenado por precipitaciones intensas (González de Vallejo, 2002) que además lo trasladan pendiente abajo junto con los flujos de detritos y barro, hasta alcanzar bermas, caminos o antiguas locaciones petroleras, como se observa en el cerro Vitteau.

Estos procesos de remoción en masa presumen una peligrosidad muy alta debido a que se removiliza un gran volumen de roca en estrecha cercanía con la urbanización capaces de destruir barrios, generar daños localizados en viviendas (fisuramiento de paredes, rotura de cañerías de agua, cloaca y gas) que claramente pueden afectar a las personas que habitan estos lugares. Estos eventos son difíciles de determinar su momento de ocurrencia. Como se observa, los deslizamientos pueden darse lentamente a lo largo de los años o desencadenarse en pocos días, mientras que la caída de roca y el flujo de detritos y barro generalmente es más rápido. El agente fundamental que los provoca o acelera es el ingreso de agua por lluvias o de forma antrópica, por riego o rotura de cañerías por lo que se debe evitar que esta infiltre. Hirtz (2003) hace hincapié sobre esto último y propone una serie de acciones a fin de estabilizar el deslizamiento de Sismográfica que puede aplicarse al resto de ellos de igual manera mediante la captación y canalización del agua de lluvia, el control de ausencia de ingreso de agua a través del monitoreo de freáticos, el aislamiento de superficie de las viviendas, la evaluación de hermeticidad de sistemas de desagües y servicios de agua y gas, el monitoreo de indicadores de inestabilidad y puntos fijos, estudios de estabilización y plan de contingencias y alerta temprana. En el caso de la caída de rocas y flujos de detritos y barro es necesario establecer un sistema de bermas sobre las laderas de menor pendiente (Talud medio) de los cerros a fin de que los materiales que se mueven pendiente abajo queden retenidos, lo que evita que llegue a la zona urbana



(únicamente al este del camino a la “Caballeriza” sobre el faldeo bajo del cerro Vitteau, posee canales de resguardo que cumplen esta función).

Afloramiento de agua subterránea: El agua subterránea, a nivel regional, tiene como punto de recarga la zona de Pampa del Castillo (oeste), la cual atraviesa el acuífero multiunitario hasta llegar a la costa (este) de Comodoro Rivadavia (Castrillo et al., 1984, como se citó en Grizinik y Hirtz, 2000). La circulación subterránea se da por sedimentos arenolimosos de Fm. Chenque, lo que le confiere elevados tiempos de tránsito y una incorporación de gran cantidad de sales (Grizinik y Hirtz, 2000; Hirtz et al., 2000b). A nivel local, en el ámbito urbano y suburbano, existe una recarga reducida sobre áreas planas y taludes sobreelevados de aguas naturales y de origen antrópico que se adicionan al flujo regional, descargando su caudal sobre el fondo de valles y sectores bajos (Grizinik y Hirtz, 2000; Hirtz et al., 2000b). En relación con esto último, la mayoría de los afloramientos descargan agua luego de unos días después de las precipitaciones por lo que se interpreta que el origen de estas aguas es meteórico, a diferencia del que se encuentra en el “Corralón Municipal” que descarga durante todo el año por lo que este podría estar vinculado a recargas por filtraciones de aguas antrópicas que descargan en estos sectores.

La mayor problemática vinculada a los afloramientos de agua es su impacto sobre la estabilidad y calidad de la estructura de las edificaciones (debido a su elevada salinidad) e inundaciones de estas, como así también la posibilidad de desencadenar procesos de remoción en masa en faldeos (Grizinik y Hirtz, 2000; Hirtz et al., 2000b) que por la saturación de las rocas puede alcanzar los límites líquidos y plásticos, variar su volumen, disminuir la capacidad portante y su resistencia, entre otras. Es por esto que debe identificarse el origen de estas aguas (naturales o antrópicas) a fin de determinar qué tipo de medida tomar. Si son naturales y se encuentran cercanas a viviendas deben ser drenadas con el objetivo de deprimir el nivel freático. En caso de ser antrópicas debe identificarse la fuente de fuga de estas y reparar.

Erosión costera: La costa de la cuenca de Km. 3 presenta una serie de acantilados activos que se caracterizan por una tasa de retracción de entre 1 y 1.25 m/año. Gómez et al. (2003) estima para el período 1973 a 2001 una erosión



relativa de entre 0.6 y 1 m por año para el sector del Hospital Alvear y entre 0.6 y 2.5 m/año para la zona de Chalet Huergo. Estos procesos erosivos generan procesos de remoción en masa acompañada por erosión hídrica. Es por esto que la peligrosidad en estos sectores se considera elevada. La retracción de los acantilados y su cercanía con la urbanización acrecenta el peligro por lo que es necesario realizar obras de contención para minimizar la erosión ya sea con muros de hormigón o escolleras de rocas de gran volumen y establecer áreas de restricción tanto en la zona alta como en las playas de acceso público.

8.5. Mapas temáticos y peligrosidad geológica

Los mapas temáticos reúnen la información de la sección anterior y la relacionan a fin de conocer como estas variables ambientales impactan en conjunto sobre el terreno, y por ende a quienes habitan estos lugares. Bueno Navarro (2014) considera que la aplicación de los SIG a evaluaciones de peligrosidad es sumamente ventajosa debido a que la combinación de diferentes fuentes de datos permite descubrir nueva información y que además otorga una mayor productividad a menor costo y resultados de mayor calidad. A partir de los resultados se comprende mejor el mundo que nos rodea y de esta manera aplicarlo a la toma de decisiones (Lo y Yeung, 2007, como se citó en Massera, 2019).

Dentro las variables analizadas, el mapa geomorfológico incluye todos los procesos descritos en la sección 7.6. *Procesos geodinámicos que afectan a la urbanización*. En coincidencia con Fernández et al. (2021), la importancia de este mapa se da porque engloba todos los procesos que ocurren y por sí solo es indicativo de la peligrosidad de una zona. Dentro de los procesos naturales que se consideran, los que más se destacan son los de remoción en masa que se categorizan con una alta peligrosidad, mientras que los de baja peligrosidad se los encuentra sobre las terrazas estructurales y fondo de valle, aunque localmente se encuentran sectores que la aumentan por la presencia de erosión hídrica, en concordancia con Tejedo et al. (1999) y Hirtz et al. (2000a). El mapa geológico se define por dos unidades principales y algunas derivadas de estas. Las rocas de la Fm. Chenque representan una peligrosidad relativamente baja por su consolidación en comparación a los depósitos coluviales y aluviales, que al ser más friables son profundamente afectados a la erosión. Hirtz et al. (2000a)



considera a las primeras (Fm. Chenque) que son buenas para ser urbanizadas en áreas planas mientras que las segundas (coluviales y aluviales) como regulares. Lo que se denomina Fm. Chenque deslizado junto a los depósitos litorales (alta peligrosidad ambos), Hirtz et al. (2000a) los cataloga como de muy malos para ser urbanizados. Otro mapa de gran incidencia en el cálculo de peligrosidad es el mapa de zona de influencia fluvial el cual da entidad a la caracterización del sistema fluvial realizada y que en general no es abordada en otros trabajos similares ya que queda implícito dentro del mapa geomorfológico, sin embargo, es de suma importancia si se tienen en cuenta los procesos erosivos por la confluencia del escurrimiento superficial y las zonas inundables, los cuales fueron los aspectos que más sobresalieron durante el temporal de 2017 y generaron mayor peligrosidad. El mapa de pendientes condiciona los tipos de procesos que pueden ocurrir según la inclinación del terreno (Fernández et al. 2021). De acuerdo con Tejedo et al. (1999) y Fernández et al. (2021) las mayores inclinaciones determinan la ocurrencia de remoción en masa y erosión hídrica de alta peligrosidad, que a medida que la pendiente se reduce su peligrosidad también lo hace. No obstante, pendientes cercanas a 0° elevan la peligrosidad por la posibilidad de inundación/anegamiento. El mapa de cobertura vegetal hace énfasis en que la desprotección del suelo genera áreas susceptibles a ser erosionadas por el flujo de agua por lo que donde escasea la vegetación la peligrosidad aumenta. Además, expone las áreas que corresponden a superficies de baja permeabilidad. El mapa de procesos antiguos, activos y potenciales toma parte de la metodología para confeccionar análisis de peligrosidad provista por el SEGEMAR (Fernández et al. 2021). Aquí se recopila la información existente de la cuenca de estudio y se incorporan los datos que el LabSIG – UNPSJB recopiló durante el temporal a través de una aplicación (ver Diez Tetamanti y Schuler, 2019). Esta última es una herramienta muy útil para conocer en profundidad las problemáticas en los barrios referidas a eventos naturales. Con base en esta información se definen los lugares puntuales donde existe ingreso de agua y barro, inundaciones, inundaciones por marejadas, desarrollo de cárcavas, problemas edilicios, deslizamientos y sus potenciales áreas afectadas.

La peligrosidad geológica se determina por la suma ponderada de los mapas temáticos. Esta se utiliza para visualizar y discriminar las zonas altamente



peligrosas de las seguras o habitables. Asimismo, permite un mayor conocimiento del funcionamiento de la cuenca de drenaje y, por lo tanto, hallar las causas de sus mayores problemáticas para poder afrontarlas con las medidas de mitigación más apropiadas. Por otro lado, la cantidad de parámetros que se utilizan al caracterizar un proceso natural para estimar la peligrosidad se vuelve en algún punto subjetivo, aunque esto no significa que se realice una incorrecta determinación, sino que conlleva una importante variabilidad en los resultados (Abad et al. 2010). A pesar de esto, existe una coincidencia en los resultados obtenidos entre el presente trabajo y los análisis de peligrosidad de Tejedo et al. (1999) y Hirtz et al. (2000a). En estos se definen a las zonas bajas (fondo de valle) con la menor peligrosidad, aunque hacen la salvedad de que los sistemas fluviales que se hallan en estos sitios la incrementan. Los taludes de baja pendiente son catalogados como de moderada peligrosidad (Tejedo et al. 1999) y regular para ser urbanizados (Hirtz et al. 2000a). Donde las pendientes son moderadas a altas, tanto Tejedo et al. (1999) como Hirtz et al. (2000a) asignan a estos sectores como de alta peligrosidad y malos para ser urbanizados debido a que se desarrollan procesos de remoción en masa. Estas valoraciones coinciden de forma general con el mapa de peligrosidad geológica de la presente investigación, en la que se destacan los hechos más problemáticos como la remoción en masa sobre pendientes elevadas, la erosión hídrica e inundaciones en las zonas bajas y en menor medida la retracción de acantilados. Asimismo, Tejedo et al. (1999) menciona que en las zonas afectadas por actividades antrópicas existe un aumento sustancial del grado de peligrosidad, esto concuerda con los procesos de erosión hídrica identificados principalmente en caminos y locaciones petroleras, y en loteo de viviendas, en los cerros de la cuenca de Km. 3.

9. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se concluye:

- Los parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje de Km. 3 indican que esta presenta una tendencia a la circularidad con pendientes elevadas y superficies de baja permeabilidad capaces de desarrollar escorrentías superficiales erosivas con bajos tiempos de concentración



que posibilitan la ocurrencia de inundaciones de tipo *flash flood*. Estas características la retratan como una de las cuencas más problemáticas de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

- Desde 1970 a la actualidad se observa un crecimiento de las áreas antropizadas que alcanzan un máximo del 48%. Esto trae como consecuencia un aumento de la escorrentía y una reducción del tiempo de concentración. Durante los eventos de precipitación extrema, la cuenca de Km. 3 moviliza un gran volumen de agua drenada superficialmente a alta velocidad (4.6 m/s) que llega a la descarga generando un pico de crecida en un lapso muy corto de tiempo, de aproximadamente 23 minutos.
- Los caudales estimados mediante los métodos de ecuación de continuidad ($Q=A*V$), SCS CN y HEC HMS, varían entre 22.54 y 41.9 m³/s, siendo más representativo del caudal máximo el valor de 41.9 m³/s.
- El mapa de peligrosidad geológica y su análisis determina que las zonas más seguras corresponden al fondo de valle, talud inferior y terrazas estructurales. No obstante, la presencia del cauce principal y sus respectivos tributarios por el centro de la cuenca elevan la peligrosidad notablemente. Los puntos de mayor conflicto en la zona baja se dan debido a la generación de cárcavas en áreas urbanizadas, las inundaciones y la retracción de acantilados. En las laderas empinadas la peligrosidad aumenta donde ocurren procesos de remoción en masa como deslizamientos, caída de rocas, flujos de barro y detritos, y erosión fluvial.
- Las cárcavas ubicadas sobre las laderas de los cerros aumentaron sus dimensiones producto de la tormenta de 2017 entre decenas a centenas de metros en longitud y unos pocos metros en ancho. La mayoría de estas se las encuentra asociadas a caminos y locaciones petroleras, y loteo de viviendas. En estos casos el aumento de la susceptibilidad a la erosión hídrica se da por la pendiente elevada, la falta de cobertura vegetal sobre los depósitos coluviales y aluviales.
- En las zonas bajas y urbanizadas las cárcavas se desarrollan por la concentración del flujo a alta velocidad sobre terrenos desprotegidos, que



históricamente estaban afectados a la erosión. El desbordamiento de los pluviales también pudo acrecentar la erosión por la humectación subterránea de los suelos debido a filtraciones.

- Actualmente, no existen medidas visibles que reduzcan las causas de erosión. Solo han sido rellenadas las cárcavas y una de ellas asfaltada (av. Fray Luis Beltrán) por lo que en este sentido la situación de las infraestructuras es muy similar a la de 2017.
- La inundación de 2017, por un lado, se vincula a las propiedades hidrológicas de la cuenca a desarrollar inundaciones de tipo *flash flood* en conjunto con las precipitaciones extremas. Por otro lado, el caudal generado por la precipitación no fue atenuado por los sistemas de drenaje urbanos. El pluvial debajo de la calle Petrolero San Lorenzo no respondió apropiadamente frente a la demanda del evento extremo de 2017. Su capacidad de desagüe ronda los 6.18 m³/s mientras que el caudal estimado para dicha tormenta varía entre 22.54 a 41.9 m³/s.
- La alcantarilla obstruida casi en su totalidad y la interposición de la Ruta Nacional N° 3 de manera transversal al flujo y sobreelevada aproximadamente 2.2 m, inevitablemente genera un área con una susceptibilidad extrema a las inundaciones. Además, la cercanía de una estación de servicio en este sector inundable implica la posibilidad de contaminación ambiental y afección de la salud de las personas.
- A pesar de todos los inconvenientes causados durante el temporal aún no se han realizado obras que mitiguen los efectos de la inundación, por lo que el sistema de desagüe se encuentra en condiciones iguales o peores para afrontar próximas precipitaciones de magnitud. Esta situación también se evidencia a través de las encuestas realizadas a los vecinos que habitan en los barrios de Km. 3, donde la gran mayoría opina que las obras son insuficientes, sobre todo, si vuelve a ocurrir un episodio similar, como la mayor parte de ellos creen que puede pasar.
- Los fenómenos de remoción en masa sobre las laderas de los cerros Vitteau y Hermitte son comunes. En general, los deslizamientos presentan una serie de causales generales como la elevada pendiente, la retención de humedad del suelo debido a la menor insolación, la presencia de



arcillas plásticas de la Fm. Chenque, las fisuras subverticales, las modificaciones en la geometría de la ladera y el diaclasamiento paralelo a la pendiente, pero el factor común disparador de todos ellos es el ingreso de agua a la masa rocosa. La caída de rocas y el flujo de barro y detritos también se ven afectados de gran manera por la presencia de agua, de hecho, muchos de estos movimientos de ladera se vieron en las lluvias de marzo – abril de 2017. Estos tipos de procesos también ocurren sobre los acantilados en el sector costero de la cuenca, que en este caso se producen por la erosión del oleaje.

- La reducción de la peligrosidad geológica generada por todos estos procesos naturales se debe dar a través de exigir protocolos de construcción de locaciones y caminos petroleros, revegetar antiguos locaciones y caminos en desuso, establecer sistema de diques de obstáculo y retención en cárcavas, establecer piletas de decantación que capten escorrentía de taludes, revegetar superficie de cárcavas y desviar escorrentía de sus cabeceras, implementar calles con banquetas que simulen la sección transversal trapezoidal o rectangular de cauces naturales, readecuar los pluviales que presenten deficiencias o realizar pluviales a cielo abierto, o bien, incorporar dos pluviales menores que capten la escorrentía de los cerros Vitteau y Hermitte con el objetivo de no concentrar el flujo de agua en el centro de cuenca, implementar sistemas de alerta temprana y planes de evacuación, mejorar avisos previos a tormentas y comunicar medidas de prevención, realizar un seguimiento continuo de los movimientos de taludes, captar y canalizar su escorrentía, monitorear el nivel freático, aislar la superficie de las viviendas, evitar el riego, evaluar el estado de los sistemas de desagües y servicios de agua y gas, monitorear indicadores de inestabilidad con puntos fijos de medida, realizar estudios de estabilización, elaborar un plan de contingencias y alerta temprana, controlar los afloramientos de agua subterránea, identificar su origen y deprimir su nivel freático o, en caso de ser antrópicas, identificar la fuente de fuga de estas y reparar, establecer sistema de bermas en taludes para detener caída de rocas y flujos de barro y detritos, proteger acantilados de erosión mediante muros o escolleras con rocas y establecer áreas de uso restringido.



- Esta serie de recomendaciones acordes a los peligros geológicos determinados intentan abordar las problemáticas con la finalidad de proporcionar, a quienes habitan este lugar, la resiliencia necesaria para afrontar el riesgo, aumentando a través de ellas la capacidad de absorción y reorganización (Walker et al., 2004; Massera, 2018).
- La metodología presentada es simple de llevar a cabo y se puede utilizar en otras cuencas de drenaje, siempre y cuando se tengan en cuenta las características predominantes de estas. Además, se considera sumamente eficiente para discriminar áreas problemáticas, lo que la hace esencial e imprescindible para tareas de planificación urbana.
- La vigencia o validez de esta evaluación se da hasta que se produzcan cambios por la aplicación de medidas de mitigación, favorables o no, sobre las áreas problemáticas. Luego de esa instancia, el análisis debería actualizarse a las nuevas condiciones, permitiendo una visualización y monitoreo continuo de la situación de la cuenca.
- Es importante realizar una recopilación, con una continuidad temporal, de información de daños denunciados por los vecinos similar al efectuado por el LabSIG durante el temporal, ya que es una herramienta eficaz para conocer en detalle cómo responde la cuenca frente a los procesos naturales y su interacción con la urbanización. De manera complementaria, y teniendo en cuenta los resultados de la encuesta llevada a cabo, se concluye que es necesario mejorar los avisos previos a un posible episodio de tormenta, especificando qué medidas preventivas tomar.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Geól. Esp. Daniel González por dirigir la parte final de este trabajo y por aportar información valiosa sobre la tormenta de 2017. Al Lic. Néstor Hirtz con quien se inició este proyecto y se encargó de dirigirme. A mis amigos Mauro Frías, Geól. Francisco Oporto, Ariel Galleguillo y a Bruno Genini por acompañarme a realizar parte del trabajo de campo. A la Geól. Silvana Rodríguez por las fotografías de la tormenta. Al LabSIG de la UNPSJB, en especial a la Dra. Cristina Massera y el Técnico Sergio Santa Cruz por el aporte



de la información recopilada de la tormenta. A los revisores Dr. José Paredes, Geól. Mariela Ocampo y Geól. Pablo Vidal por las sugerencias que contribuyeron a una sustancial mejora del manuscrito original. A mi familia y mi novia por el apoyo y acompañamiento constante.

10. BIBLIOGRAFÍA

Abad, M., López González, N., Delgado, J., Rodríguez Vidal, J., Chamorro, S., Cáceres, L. M. y Ruiz, F., 2010. Análisis y cartografía de peligrosidad geológica en el litoral de Ceuta. Revista de la Sociedad Geológica de España, 23(1-2), 37-55.

Abushandi, E., y Merkel, B., 2013. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. Water resources management, 27(7), 2391-2409.

Adikari, Y. y Yoshitani, J., 2009. Global Trends in Water-Related Disasters: an insight for policymakers. UNESCO, Francia, París.

Ameghino, F.G., 1906. Les formations sedimentaries du cetace superieur et du Tertiaire de Patagonie. Anales Museo de Historia, 8:1-568. Buenos Aires.

Argüello, G.L. y Sanabria, J.A., 2004. Erosión Hídrica Superficial. Peligrosidad Geológica en Argentina: Metodologías de análisis y mapeo. Estudio de casos. Publicación Especial N°4 de la ASAGAI, p. 141-147.

Bellosi, E.S., 1987. Litoestratigrafía y sedimentación del Patagoniano en la Cuenca del Golfo San Jorge, Terciario de las provincias de Chubut y Santa Cruz. Tesis doctoral 252p, Universidad de Buenos Aires (Inédito).

Bellosi, E.S., 1990. Formación Chenque: registro de la transgresión patagoniana de la Cuenca del Golfo San Jorge. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 57-60. San Juan.

Bellosi, E.S., Barreda, V.D., 1993. Secuencias y palinología del Terciario medio en la Cuenca del Golfo San Jorge, registro de oscilaciones eustáticas en Patagonia. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I: 78-86. Mendoza.



- Bueno Navarro, I.E., 2014.** Aplicación del SIG en la cartografía de riesgo por remoción en masa e inundación. Caso de estudio Cuenca Hanabanilla. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Santa Clara, Cuba.
- Burkard, M.B. y Kostaschuk, R.A., 1995.** Initiation and evolution of gullies along the shoreline of Lake Huron. *Geomorphology*, 14(3), 211-219.
- Cabral Marques, D., 2019.** Comodoro Rivadavia: Una ciudad de reciente integración urbana, de constitución compleja y con dificultades para pensarse/diseñarse a sí misma. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 16-33. Comodoro Rivadavia.
- Camilloni, I., 2018.** ARGENTINA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. *Ciencia e Investigación* 68, p. 5-10.
- Camino, M.A., Bó, M.J., Cionchi, J.L., Del Río, J.L., López de Armentia, A., De Marco, S.G., 2018.** Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 27, núm. 1, 2018. Universidad Nacional del Sur, Argentina.
- Campana, N. A., y Tucci, C. E., 2001.** Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban water*, 3(1-2), 113-124.
- Campos Aranda, D.F., 1998.** Procesos del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- Casalí, J., López, J.J. y Giráldez, J.V., 1999.** Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena* 36 p. 65-84.
- Castrillo, E., Grizinik, M. y Amoroso, A., 1984.** Contribución al conocimiento hidrogeológico de Comodoro Rivadavia, Chubut. *Actas IX Congreso Geológico Argentino*. Bariloche. T6: 393-406.



- Césari, O., Simeoni, A., 1994.** Planicies fluvio-glaciares terrazadas y bajos eólicos de la Patagonia Central, Argentina. 13º Symposium Latin-American Geosciences, Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, 1, 1993 1/2: 155-164.
- Clavijo R., 1986.** Estratigrafía del cretácico inferior en el sector occidental de la Cuenca Golfo San Jorge. Boletín de Informaciones Petroleras, 9:15-32. Buenos Aires.
- Crichton, D., 2008.** Urban Flood Risk Management-A Tool for Integrated Flood Management, (WMO/GWP Associated programme on flood Management), Flood management tool Series. World Meteorological Organization.
- Cuitiño, J.I., Scasso, R., Ventura Santos, R., Mancini, L., 2015.** Sr ages for the Chenque Formation in Comodoro Rivadavia región (Golfo San Jorge basin, Argentina): stratigraphic implications. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 22(1): 3-12.
- Díez Herrero, A., Isidro, M. L., Ballesteros, J. A., y Ruiz, V. (2009).** Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(3), 254-263.
- Diez Tetamanti, J.M. y Schuler, L., 2019.** Proceso y producción del registro de daños ante el temporal, Comodoro Rivadavia, 2017. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 16-33. Comodoro Rivadavia.
- Doyle, M. W., Harbor, J. M., Rich, C. F., y Spacie, A., 2000.** Examining the effects of urbanization on streams using indicators of geomorphic stability. Physical Geography, 21(2), 155-181.
- El Alfy, M., 2016.** Assessing the impact of arid area urbanization on flash floods using GIS, remote sensing, and HEC-HMS rainfall-runoff modeling. Hydrology Research, 47(6), 1142-1160.



- El-Hames, A. S., 2012.** An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number. *Journal of hydrology*, 456, 94-100.
- Feldman, A.D., 2000.** Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. U.S. Army of Engineers.
- Fernández, D.S., Coppolecchia, M., Balbi, A.B., Barber, E.L.G., Bedmar, J.M., Boujon, P.S., Cabrera, N.R., Chávez, R.A., Elissondo, M., Jones, E.J., Kaufman, J.F., Pereyra, F.X., Rosas, M.A., Róvere, E.I., Tello, N.E., Tobío, M.I., Villegas, D.C. y Tejedo, A. G., 2021.** Normativa para la Cartografía de Peligrosidad Geológica de la República Argentina a Escala 1: 250.000.
- Feruglio, E., 1938.** Relaciones estratigráficas entre el Patagoniano y el Santacruciano en la Patagonia Austral. *Revista Museo La Plata (N.S.)* 1 Sec. Geol.: 129-159. La Plata.
- Feruglio, E., 1949.** Descripción Geológica de la Patagonia. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Vol. 1: 1-334. Buenos Aires.
- Feruglio, E., 1950.** Descripción geológica de la Patagonia. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Vol., 3: 1-431. Buenos Aires.
- 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 la Ciencia de la Tierra Eduardo Musacchio*, p. 40-42. Comodoro Rivadavia.
- Galster, J.C., Pazzaglia, F.J., Hargreaves, B.R., Morris, D.P., Peters, S.C. y Weisman, R.N., 2006.** Effects of urbanization on watershed hydrology: The scaling of discharge with drainage area. *Geology*, 34(9), 713-716.
- García, S.G., Francés, F. y Andreu, J., 2002.** Simulación hidrológica basada en SIG: Sensibilidad a factores de escala. *Ingeniería del agua*, 9(3), 295-308.
- Gholami, V., Mohseni Saravi, M., y Ahmadi, H., 2010.** Effects of impervious surfaces and urban development on runoff generation and flood hazard in



the Hajighoshan watershed. Caspian journal of environmental sciences, 8(1), 1-12.

Giacosa, R., Paredes, J., Nillni, A., Ledesma, M. y Colombo, F., 2003. Fallamiento normal terciario en la Cuenca del Golfo San Jorge. Margen sudatlántico, Patagonia Argentina. Geotemas 5: 89-94

Giacosa, R., Paredes, J., Nillni, A., Ledesma, M. y Colombo, F., 2004. Fallas normales de alto ángulo en el Neógeno del margen Atlántico de la Cuenca del Golfo San Jorge (46°S-67°30'O, Patagonia Argentina). Boletín Geológico y Minero, 115 (3): 537-550.

Gil, V., Volonte, A. y Campo, A. M., 2019. Índices Morfométricos A Diferentes Escalas Aplicados Al Peligro De Crecidas En Cuencas Pequeñas. Cuenca Del Arroyo San Bernardo, Argentina. Revista Brasileira de Geomorfologia, 20(4).

Gómez, A., Iantanos, N., Jones, M., 2003. Dinámica costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia. SEGEMAR. Serie de contribuciones técnicas, Peligrosidad Geológica N°7. Informe técnico. Buenos Aires.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. Pearson educación, Madrid.

González, D.F., 2017. Análisis de variables que participan en la formación y evolución de cárcavas en el ejido municipal de la ciudad de Comodoro Rivadavia y sectores aledaños. [Tesis de especialización no publicada]. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

González, M.A., Roverano, D., Fauqué, L., 2002. Estudio de Peligrosidad Geológica en el Barrio Sismográfica. Serie de contribuciones técnicas, Peligrosidad Geológica N°4. Informe técnico. Buenos Aires.

González Uriarte, M. y Navarro, E., 2004. Inundación y Anegamiento. Peligrosidad Geológica en Argentina: Metodologías de análisis y mapeo. Estudio de casos. Publicación Especial N°4 de la ASAGAI, p. 219-221.

Gravelius, H., 1914. Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin.



- Grizinik, M. y Hirtz, N. 2000.** Salinización en el ejido urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut. Argentina. Evaluación y propuesta de saneamiento. Águas Subterráneas.
- Gutiérrez Elorza, M., 2008.** Geomorfología. Pearson, p. 1 – 898. Madrid, España.
- Hirtz, N., Pérez, H., Grizinik, M., Tejedo, A., Blachakis, A., Stronati, M. y Cavallaro, S., 2000a.** Uso de mapas temáticos en la confección de la carta geoambiental de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N°14, p. 56-75. Buenos aires, Argentina.
- Hirtz, N., Grizinik, M., Blachakis, A., 2000b.** EVALUACIÓN GEOHIDROLOGICA APLICADA AL DESARROLLO URBANO DE LA CIUDAD DE COMODORO RIVADAVIA, CHUBUT, ARGENTINA. Águas Subterráneas.
- Hirtz, N., 2003.** Diagnóstico Geológico – geotécnico de los procesos de inestabilidad que afectan al Barrio “El Marquesado” de la Ciudad de Comodoro Rivadavia. Chubut. Argentina. Buenos Aires. ASAGAI.
- Hirtz, N.R., Barletta, R.H., Paredes, J.M., 2019.** La estabilización de los faldeos sur y este del cerro Chenque: una reseña del pasado reciente, diagnóstico presente y visión a futuro. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 205-220. Comodoro Rivadavia.
- Horton, R., 1932.** Drainage Basin Characteristics. Transactions, American Geophysical Union, 13, p. 350-361.
- Horton, R.E., 1945.** Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America 56, p. 275-370.
- Infobae., 8 de abril de 2017.** 27 imágenes de las inundaciones en Comodoro Rivadavia. Infobae. <http://www.infobae.com>.



- Kirkby, M.J. y Bracken, L.J., 2009.** Gully processes and gully dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 34(14), 1841-1851.
- Kirpich, Z.P. 1940.** Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10(6): 362.
- Lavell, A., 1996.** Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y Conceptos: Hacia la definición de una agenda de investigación. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*.
- Lavell, A., 2003.** La Gestión Local del Riesgo: Nociones y Precisiones en torno al Concepto y la Práctica. Programa Regional para la Gestión del Riesgo en América Central CEPREDENAC-PNUD.
- Legarreta, L., Uliana, M., 1994.** Asociaciones de fósiles y hiatos en el Supracretácico-Neógeno de Patagonia: una perspectiva estratigráfico-secuencial. *Ameghiniana*, 31(3): 257-281.
- Lesta, P., 1968.** Estratigrafía de la Cuenca del Golfo San Jorge. 3º Jornadas Geológicas Argentinas, 1:251-280. Buenos Aires.
- Lesta, P., Ferello, R., 1972.** Región Extra-andina del Chubut y norte de Santa Cruz. En *Geología Regional Argentina: Academia Nacional de Ciencias*: 601-654. Córdoba.
- Lesta, P., Ferello, R., Chebli, G., 1980.** Chubut extraandino. In: Turner, J.C. (Ed.), *II Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias*, 2:1307-1387. Córdoba.
- Liu, Y. B., De Smedt, F., Hoffmann, L., y Pfister, L., 2005.** Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach. *Environmental modeling & assessment*, 9(4), 227-235.
- Lo, C.P. y Yeung, A.K.W., 2007.** Concepts and techniques of geographic information systems, 2 Ed, New Delhi: Prentice-Hall, 518-532.
- Maksimovic, C. y Tucci, C., 2001.** Urban drainage in specific climates, Urban drainage in humid tropics. vol. I. IHP-V, Technical documents in hydrology UNESCO. Paris. 40, 227.



- Manning, R. 1891.** On the flow of water in open channels and pipes. Transactions of the Institute of Civil Engineers of Ireland 20: 161-207.
- Massera, C.B., 2018.** Modelo ambiental con Sistemas de Información Geográfica aplicado a la gestión de riesgo de desastres urbano: el caso Comodoro Rivadavia (Chubut, Argentina) 2008-2017. (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Buenos Aires.
- Massera, C.B., 2019.** Tecnología de información geográfica aplicada al riesgo de desastres urbanos. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 16-33. Comodoro Rivadavia.
- Matteucci, S. D., y Colma, A., 1982.** Metodología para el estudio de la vegetación (Vol. 22). Washington, DC: secretaria general de la Organización de los Estados Americanos.
- Miller, V. C., 1953.** A quantitative study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Dept. of Geology, Columbia Univ., New York, Technical Rep., No. 3, Office of Naval Research, Contract N60NR 271-30.
- Melton, M.A., 1957.** An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology. Columbia Univ New York.
- Mishra, S.K., y Singh, V.P., 2003.** SCS-CN Method. In Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology (pp. 84-146). Springer, Dordrecht.
- M.J.I., 1995.** Resolución de 31 de enero, Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. B.O.E., 38 (14 febrero), 4846-4858.
- Moeyersons, J., 1991.** Ravine formation on steep slopes: forward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda. Catena, 18(3-4), 309-324.
- Montes, A., Rodríguez, S.S., San Martín, C.N., Allard, J.O., 2015.** Migración de campos de dunas en cañadones costeros de Patagonia.



Geomorfología e implicancias paleoclimáticas. Revista de la Sociedad Geológica de España 28 (2), 65-76.

Natarajan, S., y Radhakrishnan, N., 2019. Simulation of extreme event-based rainfall–runoff process of an urban catchment area using HEC-HMS. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1867-1881.

Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M. y Govers, G., 2002. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1267-1283.

Ocampo, S.M., Foix, N., Paredes, J.M., 2019. Las huellas del agua. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. *Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo*. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 16-33. Comodoro Rivadavia.

Ogura, A. y Soares Macedo, E., 2005. Procesos y Riesgos Geológicos. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. p. 112-135.

Oporto, F.E., Allard, J.O., Paredes, J.M., Foix, N., Valle, M., N., Cortés, M., Rodríguez, A.R., Iturra, D.A., Reyes, I., Sánchez, F.M., Guerra, M., 2022. Arquitectura y análisis dinámico de fallas mesoscópicas en afloramientos de la Formación Chenque (Mioceno Inferior-Medio) en la cuenca del Golfo San Jorge. XXI Congreso Geológico Argentino (virtual), p. 127-128.

Paredes, J.M., 2002. Asociación de facies y correlación de las sedimentitas de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 9 (1): 53-64.

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., Valle, M.N., 2017. Sistemas fluviales efímeros e



inundaciones repentinas de la ciudad de Comodoro Rivadavia: causas, procesos y mitigaciones. Informe Técnico FCNyCS. UNPSJB, p. 1-44. Comodoro Rivadavia.

Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia (UNPSJB), pp. 1-305. Comodoro Rivadavia. ISBN 978-950-763-123-8.

Paredes, J.M., Ocampo, S.M., 2019. Sistemas fluviales efímeros de Comodoro Rivadavia. En: Paredes, J.M. (Compilador), 2019. Comodoro y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 16-33. Comodoro Rivadavia.

Paredes, J.M., Ocampo, S.M., Foix, N., Olazábal, S.X., Valle, M.N. y Allard, J.O., 2020. Precipitaciones extremas e inundaciones repentinas en ambiente semiárido: impactos del evento de marzo-abril de 2017 en Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 77(2), 296-318.

Paredes, J. M., Ocampo, S. M., Foix, N., Olazábal, S. X., Valle, M. N., Montes, A. y Allard, J. O., 2021. Geomorphic and Sedimentological Impact of the 2017 Flash Flood Event in the City of Comodoro Rivadavia (Central Patagonia, Argentina). In Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina (pp. 3-29). Springer, Cham.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. y Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena, 50(2-4), 91-133.

Rabassa, J., 2010. El cambio climático global en la Patagonia desde el viaje de Charles Darwin hasta nuestros días. Revista de la Asociación Geológica Argentina 67 (1): 139-156.

Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., y Mishra, V. N., 2014. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. Applied Water Science, 7(1), 217-232.



- Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N., Singh, A., Sajan, B., y Shahi, A. P., 2019.** Geospatial approach for quantitative drainage morphometric analysis of Varuna River basin, India. *Journal of Landscape Ecology*, 12(2), 1-25.
- Rakesh, K., Lohani, A.K., Sanjay, C.C. and Nema, R.K. 2000.** GIS based morphometric analysis of Ajay River basin up to Sararath gauging site of south Bihar; *J. Appl. Hydrol.* 14(4) 45–54.
- Reddy, G. P. O., Maji, A. K., y Gajbhiye, K. S., 2004.** Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India—a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1), 1-16.
- Romshoo, S.A., Bhat, S.A., Rashid, I., 2012.** Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus basin. *J Earth Syst Sci* 121(3):659–686
- Samal, D.R., Gedam, S.S., Nagarajan, R., 2014.** GIS based drainage morphometry and its influence on hydrology in parts of Western Ghats region, Maharashtra, India. *Geocarto Int* 30(7):755–778
- Satheeshkumar, S., Venkateswaran, S., Kannan, R., 2017.** Rainfall–runoff estimation using SCS–CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub basin, South India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(1), 24.
- Sciutto, J.C., Césari, O. e Iantanos, N., 2008.** Hoja geológica 4569-IV Escalante, escala 1:250000: Programa Nacional de Cartas Nueva unidad litoestratigráfica del grupo Chubut. 95 Geológicas de la República Argentina, Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 351, 76p. Buenos Aires.
- Schumm, S.A., 1956.** The evolution of drainage systems and slopes in bad lands at Perth, Amboi, New Jersey. *Geol. Soc. Ame. Bull.* 67 (5), pp. 597-646.
- Sciutto, J.C., 1981.** Geología del Codo del Río Senguerr, Chubut, Argentina. 8° Congreso Geológico Argentino, 3: 203-219. San Luis.



- SCS. 1972.** Hydrology, National Engineering Handbook. Washington, D.C.: USDA Soil Conservation Service.
- Seutloali, K.E., Beckedahl, H.R., Dube, T. y Sibanda, M., 2016.** An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach. *Geocarto International*, 31(2), 225-239.
- 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.
- Singh, P., Thakur, J. K., y Singh, U. C., 2013.** Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. *Environmental earth sciences*, 68(7), 1967-1977.
- Strahler, A.N., 1956.** Quantitative Slope Analysis. *Bulletin of the Geological Society of America* Vol. 67, p. 571-596.
- Strahler, A.N., 1958.** Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Chow, V.T., Ed., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York, 439-476.
- Tchilinguirian, P., 2003.** Evaluación de Peligrosidad Geológica en el barrio Divina Providencia. Serie de contribuciones técnicas, Peligrosidad Geológica N°9. Informe técnico. Buenos Aires.
- Tejedo, A. G., Pereyra, F. X., Anielli, C., Jones, M., 1999.** Hoja de Peligrosidad Geológica 4566-III Comodoro Rivadavia. SEGEMAR.
- Varnes, D.J., 1984.** Landslide Hazard Zonation: A Review of Principle and Practice, *Natural Hazard*. UNESCO, París.
- Vidal, P.A. y Hirtz, N., 2017.** Análisis del deslizamiento ocurrido en el faldeo oeste del cerro Vitteau. V Jornadas de la Ciencia de la Tierra Eduardo Musacchio, p. 40-42. Comodoro Rivadavia.
- Vidal, P.A., 2018.** Reconocimiento geológico y caracterización del comportamiento geomecánico de unidades de suelos y rocas sedimentarias, en un entorno urbano y periurbano de la ciudad de



Comodoro Rivadavia. Barrios Divina Providencia y Sismográfica. (Tesis de grado inédita). Universidad Nacional de la Patagonia san Juan Bosco, Facultad de Ciencias naturales y de la salud. Comodoro Rivadavia, Chubut

Waikar, M. L., y Nilawar, A. P., 2014. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2(2014), 179-184.

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. y Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2).

Wilches-Chaux, G., 1993. Cap.II “La vulnerabilidad global”. En Andrew Maskrey (Editor). *Los desastres no son naturales: LA RED de estudios sociales*. p. 9-50. Primera edición, Bogotá. Colombia.

Windhausen, A., 1924. Líneas generales de la constitución geológica de la región situada al oeste del Golfo San Jorge. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 27: 167-320. Córdoba.

Xiao, B., Wang, Q. H., Fan, J., Han, F. P. and Dai, Q. H., 2011. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. *Pedosphere*. 21(6): 738–749.

Zambrano Nájera, J., 2015. Tesis Doctoral: Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo físico basado en SIG. Universitat Politècnica de Catalunya.

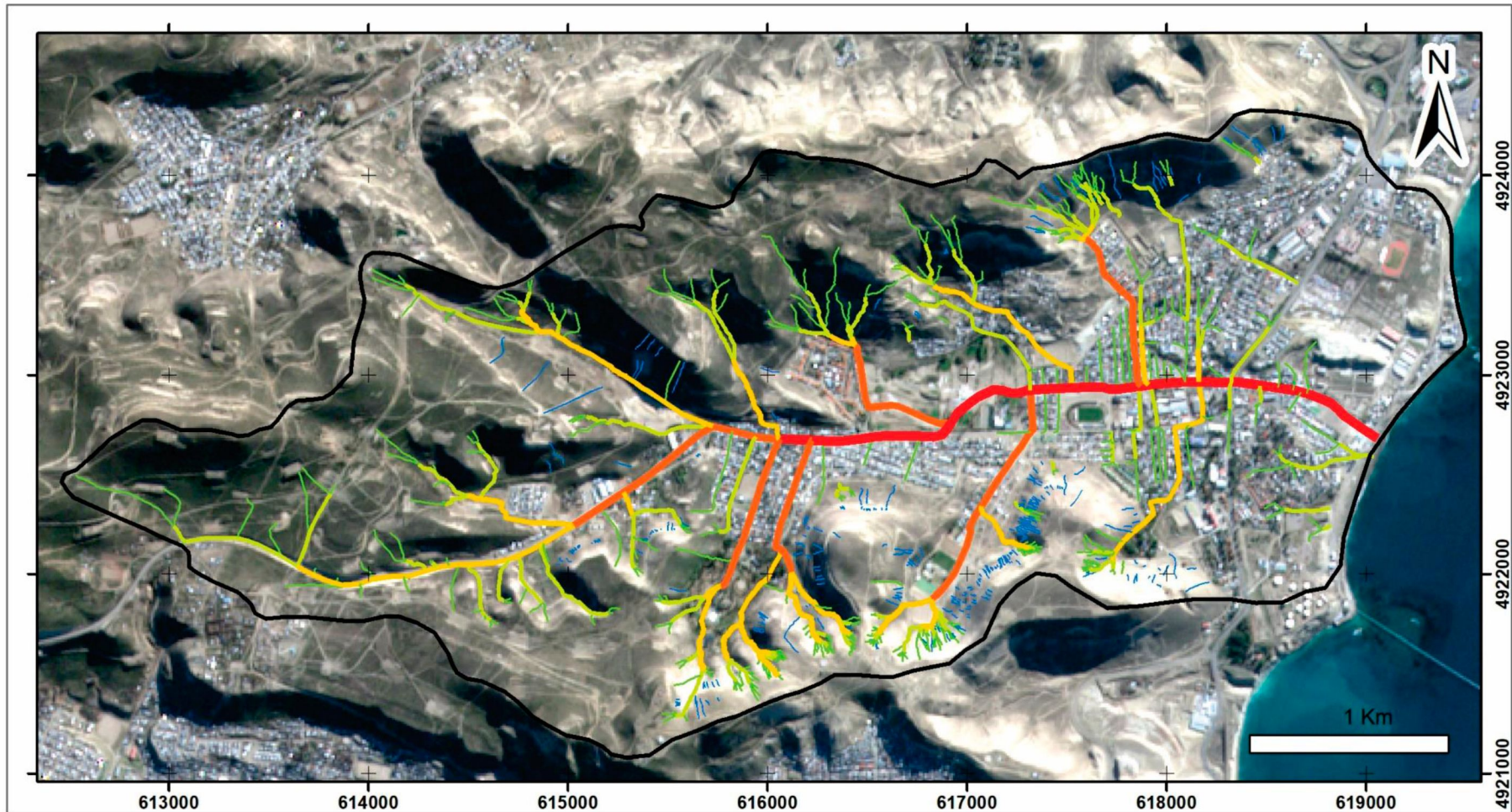
Zhang, Y., y Shuster, W., 2014. Impacts of spatial distribution of impervious areas on runoff response of hillslope catchments: simulation study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(6), 1089-1100.

Licencia ArcGIS 10.5. Cliente: #100222 – Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco Facultad Ciencias Naturales, Autorización licencias ArcGIS Desktop 10.5 Advanced – Autorización Code EFL379626744.



11. ANEXOS

Mapa de Sistema fluvial de la Cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

| | |
|------------------|---------------|
| Límite de cuenca | Cauces |
| Rills | Orden 3 |
| | 1 4 |
| | 2 5 |

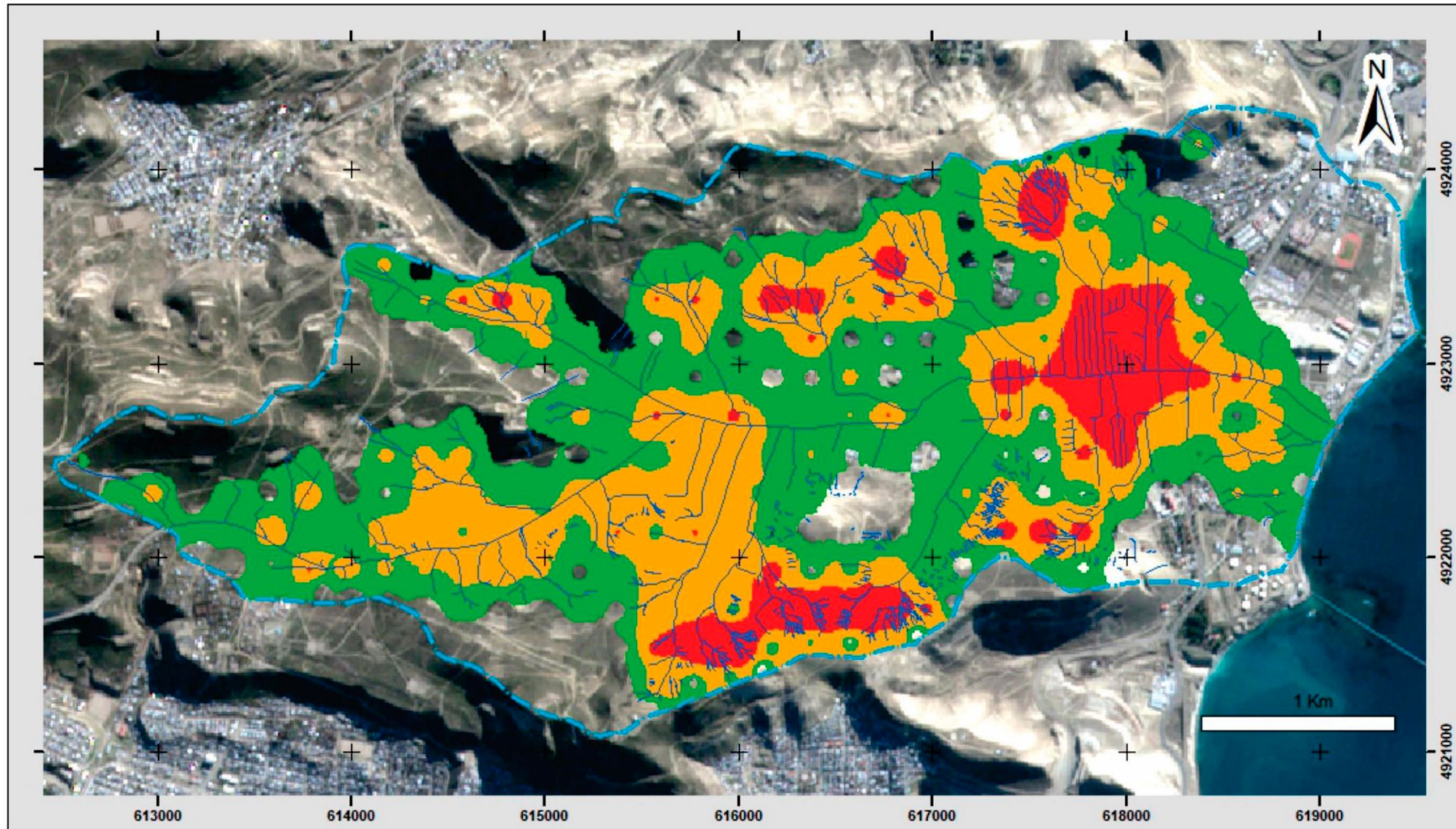
Escala 1:26000

WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Mapa de elaboración propia en base a interpretación
de imágenes satelitales Sentinel 2 e imágenes
de alta resolución (Google Earth)

Autor: Cortés Maximiliano

Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut.



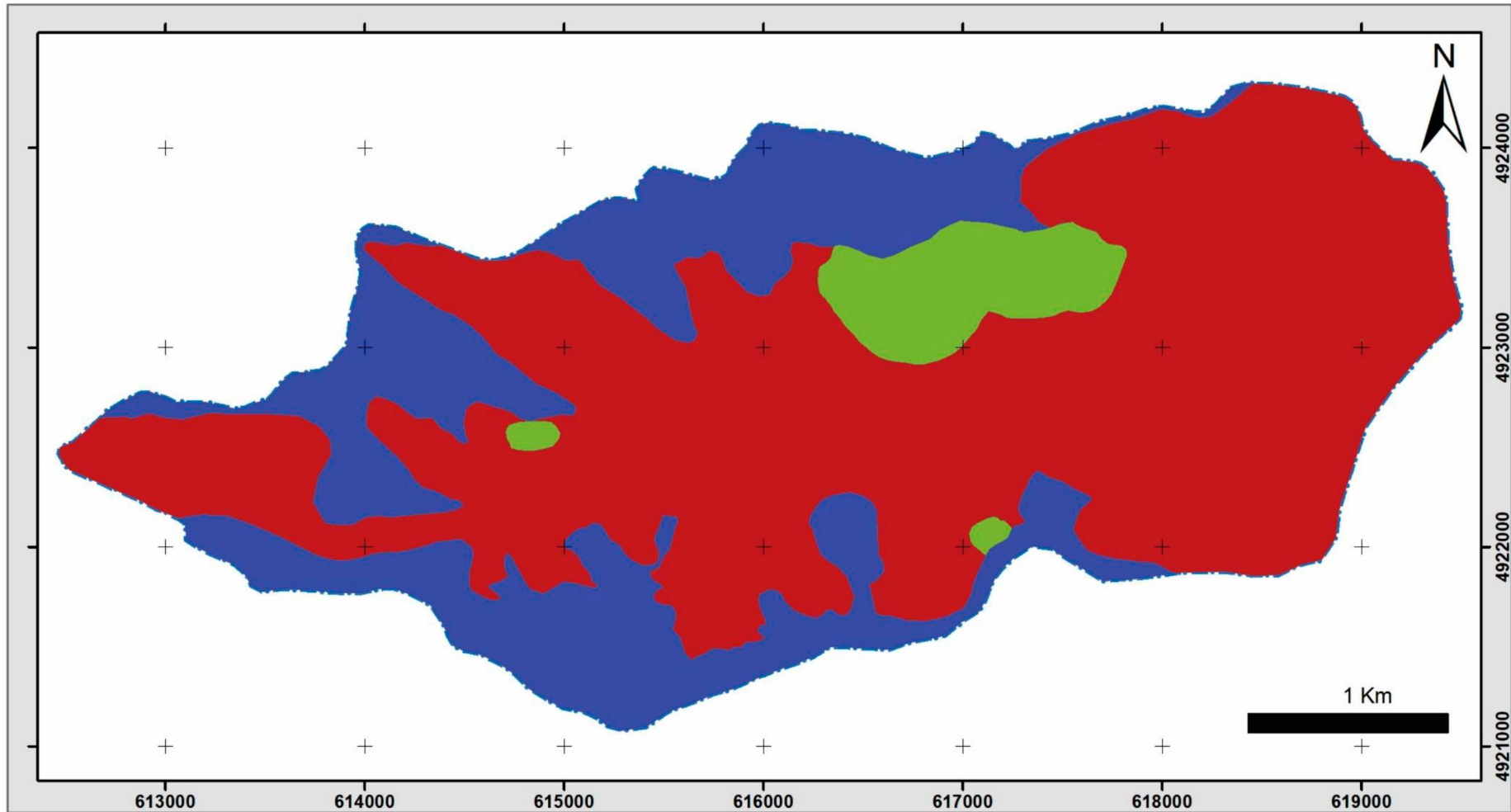
| Referencias | |
|--------------------|---------------------|
| Límite de cuenca | Densidad de drenaje |
| Sistema de drenaje | Baja |
| | Moderada |
| | Alta |

WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator





Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia
en base a interpretación de imágenes satelitales
Sentinel 2 e imágenes de alta resolución (Google Earth).
Autor: Cortés Maximiliano

Mapa de Grupos Hidrológicos de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

| | | | |
|---|------------------|---|---|
|  | Límite de cuenca | Grupos Hidrológicos | |
|  | B |  | D |
|  | C | | |

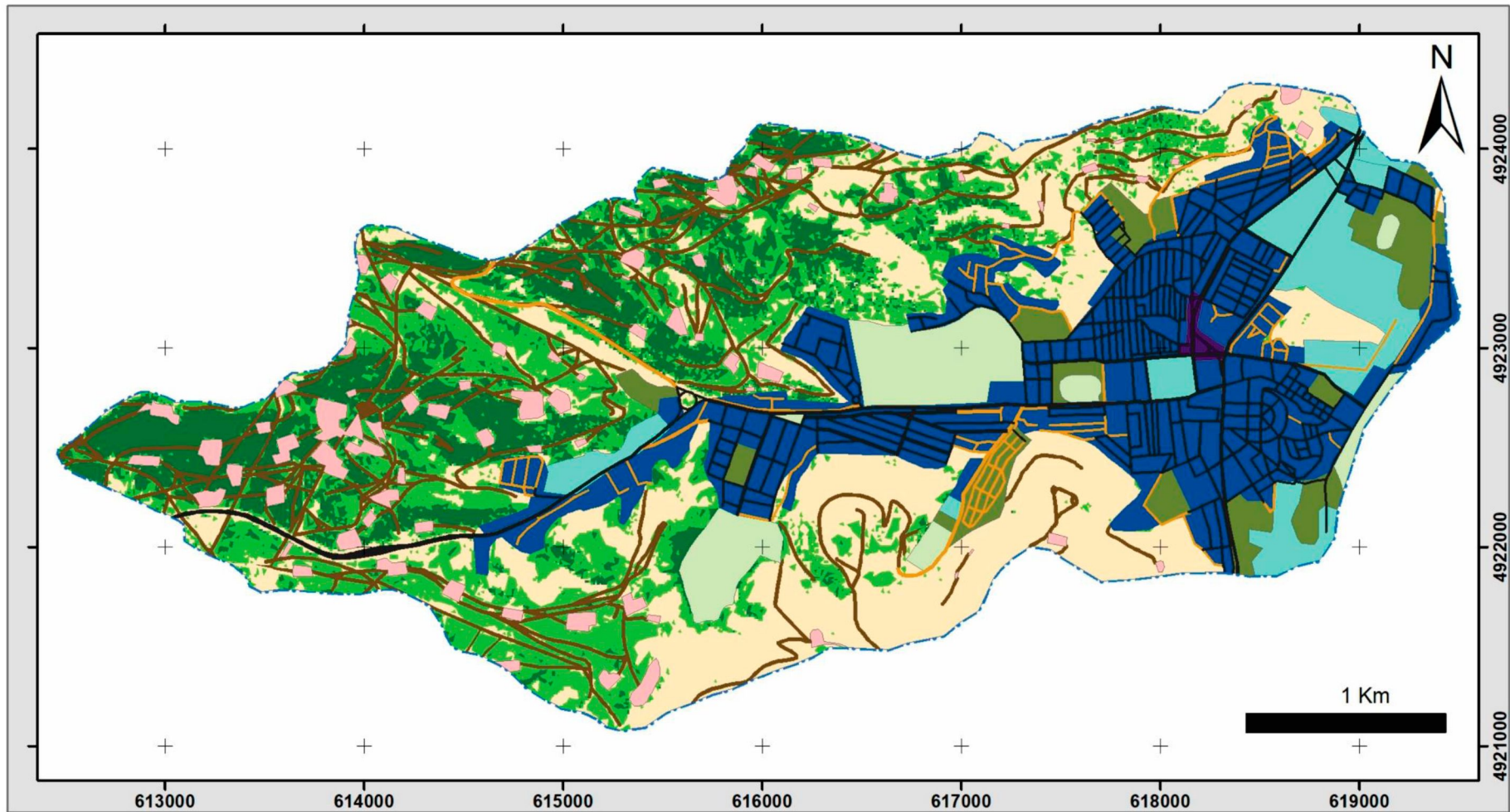
WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia
en base a imágenes satelitales Sentinel 2
y de alta resolución (Google Earth).

Autor: Cortés Maximiliano

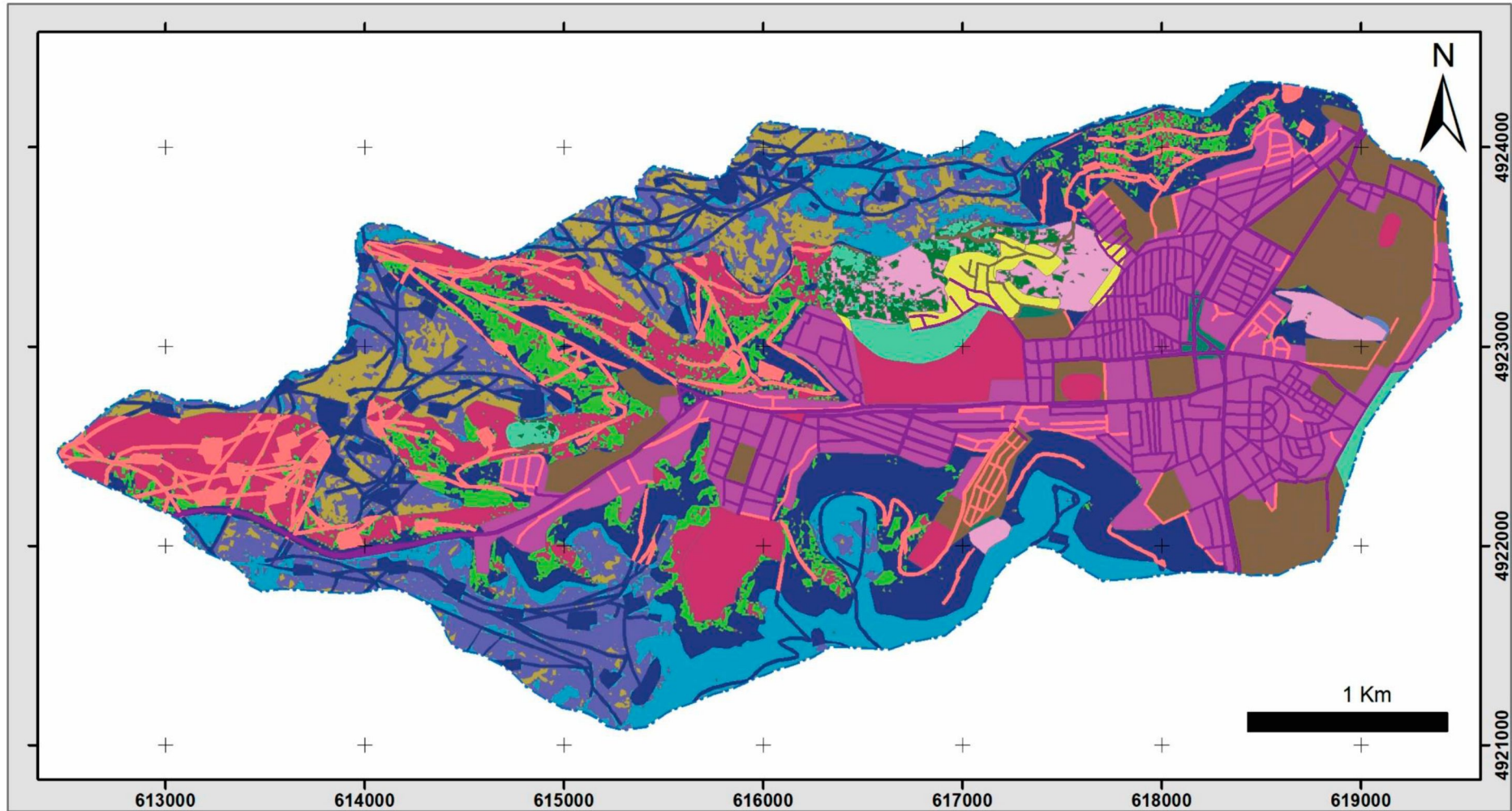
Mapa de Uso de suelos de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



| Referencias | | | |
|-------------|------------------------|--|----------------------------|
| | Límite de cuenca | | Caminos petroleros |
| | Locación petrolera | | Zona Ocio |
| | Cobertura vegetal Alta | | Zona Comercial |
| | Pavimento | | Zona Industrial |
| | Calles de tierra | | Cobertura vegetal Moderada |
| | Cobertura vegetal Baja | | Zona Desarrollo |
| | Zona Residencial | | |

WGS 84 UTM Zona 19S
 Transversa Mercator
 Escala 1:26000
 Mapa de elaboración propia
 en base a imágenes satelitales Sentinel 2
 y de alta resolución (Google Earth).
 Autor: Cortés Maximiliano

Mapa de Curva Número (CN) de la cuenca de Km. 3, Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

| | | | | |
|---|--|--|---|--|
|  Límite de cuenca CN |  77 |  85 |  90 |  94 |
| |  68 |  79 |  86 |  91 |
| |  72 |  81 |  88 |  92 |
| |  84 |  89 |  93 | |

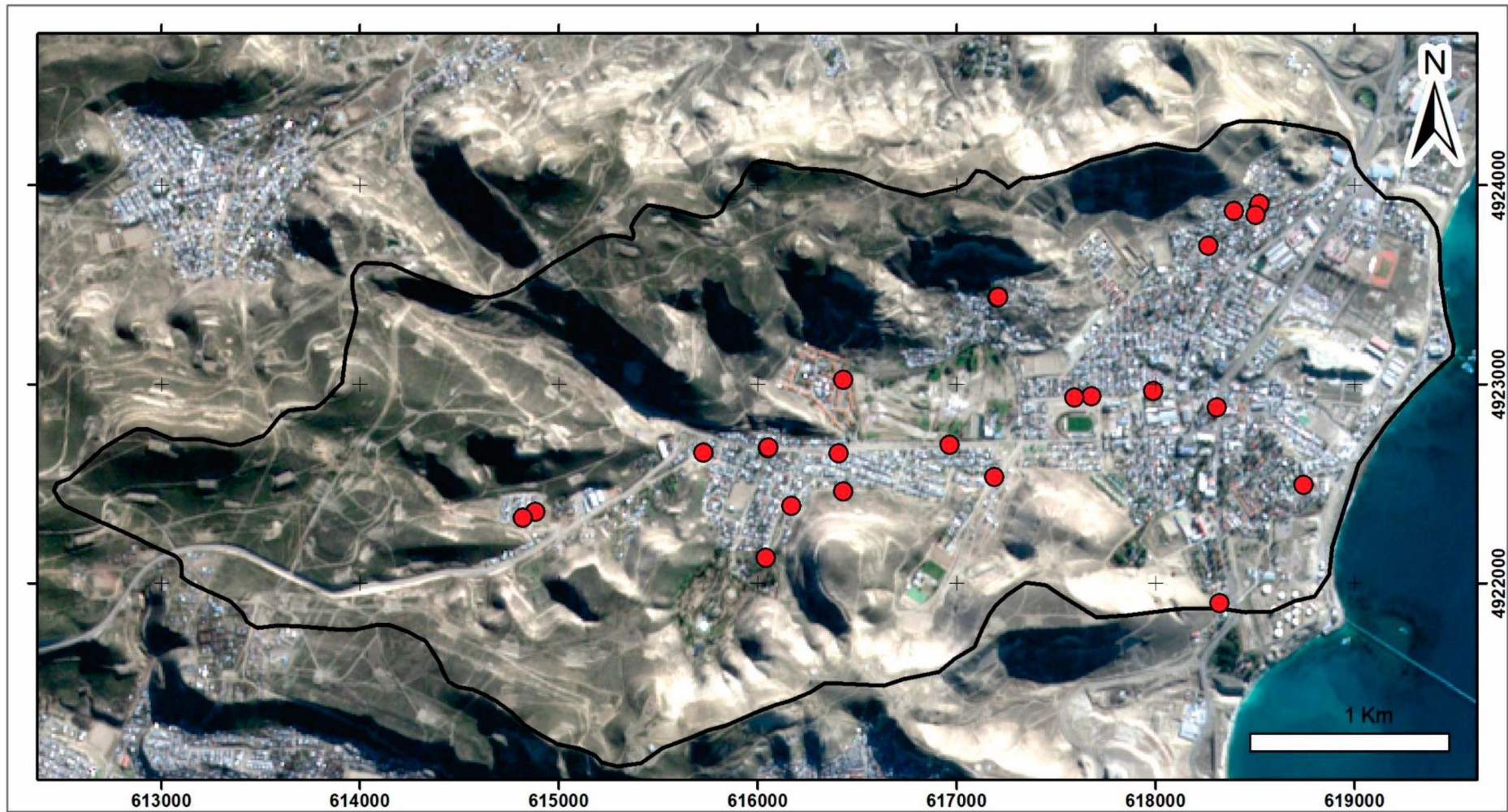
WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Escala 1:26000

Mapa de elaboración propia
en base a imágenes satelitales Sentinel 2
y de alta resolución (Google Earth).

Autor: Cortés Maximiliano

Denuncias de cárcavas en la cuenca de Km. 3 (2017), Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

□ Límite de cuenca ● Cárcavas

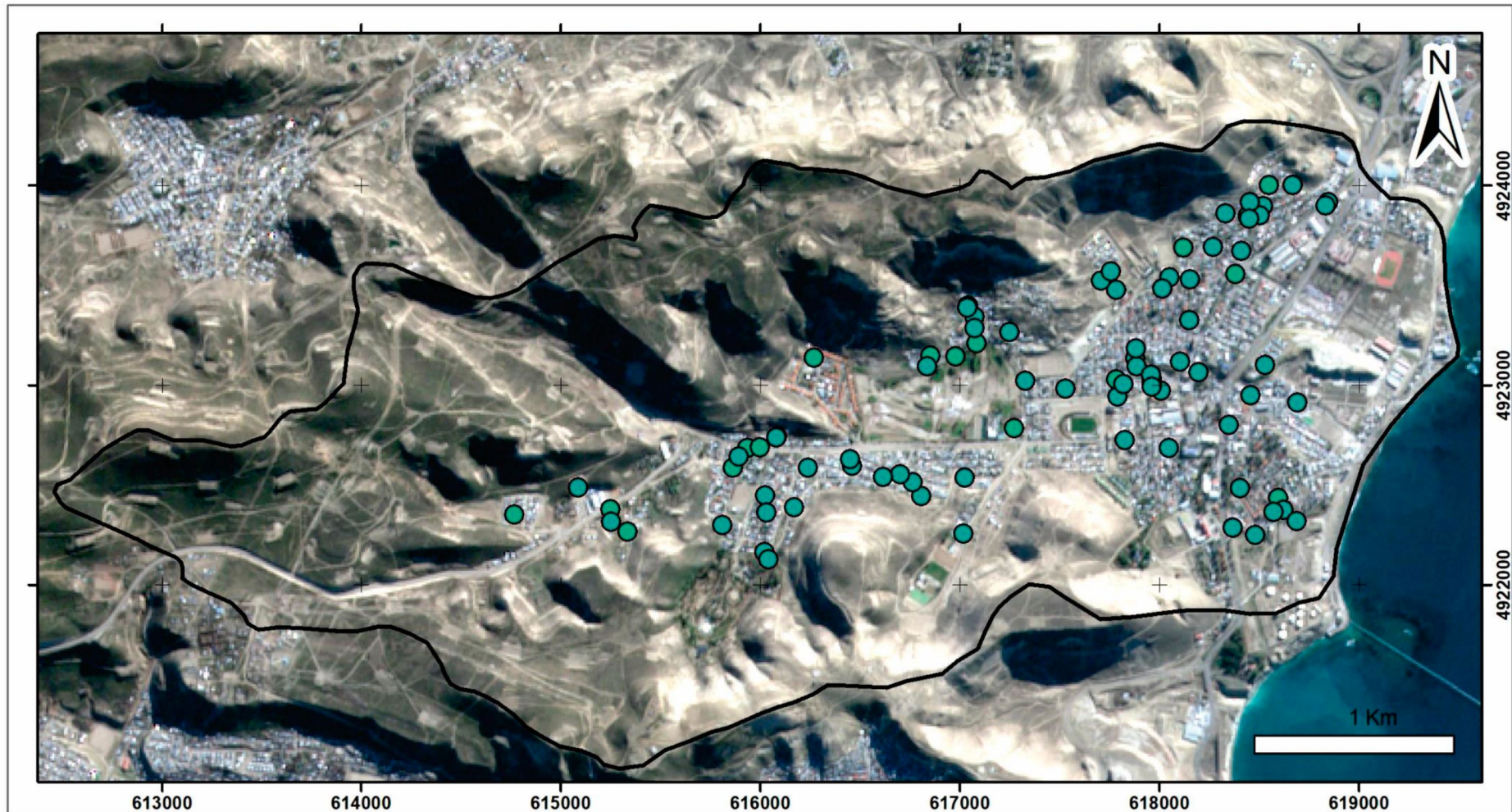
Escala 1:26000

WGS 84 UTM Zona 19S
Transversese Mercator

Mapa de elaboración propia
a partir de la base de datos otorgada
por el LabSIG de la UNPSJB

Autor: Cortés Maximiliano

Denuncias de ingreso de agua en la cuenca de Km. 3 (2017), Comodoro Rivadavia, Chubut



Referencias

□ Límite de cuenca ● Ingreso de agua

Escala 1:26000

WGS 84 UTM Zona 19S
Transversa Mercator

Mapa de elaboración propia
a partir de la base de datos otorgada
por el LabSIG de la UNPSJB

Autor: Cortés Maximiliano