

1 **Procesos de remoción en masa asociados a la dinámica de cuencas como base para**
2 **la selección de alternativas de un camino de montaña. Caso de estudio: Ruta 150,**
3 **Cuesta del Viento – Pachimoco, Argentina**

4 *Landslides and basin analysis as basis for the alternatives trace selection of a mountain*
5 *road. Case study: 150 route, Cuesta del Viento-Pachimoco. San Juan, Argentina.*

6
7 Carla GINESTA¹, Raúl Emmanuel OCAÑA¹, Natalia RIOS¹, María Yanina ESPER
8 ANGILLIERI^{1,2}, Miguel PEREYRA², Oscar Mario FERNÁNDEZ², Carlos GONZÁLEZ
9 ALLADIO² y Eugenia RUIZ²

10
11 ¹CIGEOBIO. UNSJ-CONICET. Centro de Investigaciones de la Geosfera y la Biosfera,
12 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas,
13 Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.

14 Email: yaninaesper@gmail.com

15 ²UNSJ - Facultad de Ingeniería, EICAM.

16
17
18 **Número de páginas: 22**

19 **Figuras: 3**

20 **Cuadros: 3**

21 **Gráficos: 1**

22

23

24

25

26

27

28 **RESUMEN**

29 Los procesos de remoción en masa de origen climático o geoclimáticos, principalmente
30 flujos, son los más frecuentes y destructivos en el mundo. En el presente trabajo se analizan
31 diversas características morfométricas de cuencas, se calculan los caudales máximos
32 teóricos y se realiza un inventario de procesos de remoción en masa (*debris flow/flood*), con
33 el objeto de evaluar su ocurrencia como base para la selección de alternativas de un camino
34 de montaña. El área seleccionada para este estudio corresponde a un tramo precordillerano
35 de la ruta N° 150 en su tramo Cuesta del Viento – Pachimoco en el norte de la Provincia de
36 San Juan. Los resultados indican que la ocurrencia de estos procesos está determinada
37 principalmente por las fuertes pendientes y una alta torrencialidad que ante la presencia de
38 lluvias excepcionales y la convierte en una zona potencialmente peligrosa con posibilidades
39 de altos niveles de destrucción. Finalmente, el número de rugosidad de Melton es clave
40 para discriminar cuencas susceptibles a la ocurrencia de diferentes tipos de flujos.

41 **PALABRAS CLAVES:** flujos; cuencas; San Juan

42
43 **ABSTRACT**

44 *Landslides related with river basins for the selection of alternatives trace of a mountain road.*

45 *Case of study: Cuesta del Viento - Pachimoco section of Route 150, Argentina.*

46 Landslides of climatic or geoclimatic origin, mainly flows, are the most frequent and
47 destructive processes in the world. In this work some basins morphometric analyzes,
48 theoretical maximum peak discharge are calculated and an inventory of landslides (*debris
49 flow/flood*) is carried out, in order to evaluate landslides occurrence for the selection of
50 alternatives trace of a mountain road. The chosen area includes a stretch of National Road
51 No. 150 on a PreAndes sector between Cuesta del Viento – Pachimoco. The results show
52 that the occurrence of these processes is mainly determined by the steep slopes and heavy
53 seasonal rains and turns it into a potentially hazardous area with possibilities of high levels

54 of destruction. Finally, the Melton ratio number has been a key morphometric index to
55 discriminate river basins susceptible to different types of flows.

56 **KEYWORDS:** flows; basin; San Juan

57

58 INTRODUCCIÓN

59

60 La infraestructura de transporte vial tiene un rol imprescindible en el funcionamiento de la
61 sociedad. Los procesos de remoción en masa (PRM) afectan negativamente al flujo
62 vehicular de las redes de transporte en todo el mundo, destruyendo y/o bloqueando rutas.

63 Las regiones caracterizadas por topografía abrupta son extremadamente susceptibles a la
64 ocurrencia de PRM, y por lo general, en aquellas zonas áridas con escasas y vegetación,
65 entre los distintos PRM, predominan los flujos de detritos. Un flujo de detritos (*debris flow*)
66 es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, de comportamiento
67 no plástico, en un canal de gran pendiente (Hungr et al. 2001), ocurre periódicamente,
68 posee una recorrido ya establecido (por lo general encausado en quebradas y en cursos de
69 primer y segundo orden) (Hungr et al. 2014).

70 Según Costa (1988), los procesos que ocurren en pequeñas y escarpadas cuencas pueden
71 ser divididos en flujos de corriente (*stream flow*), flujos hiperconcentrados (*debris flood* o
72 *hyperconcentrated flows*) y flujos de detritos (*debris flows*). Particularmente un flujo de agua
73 es un flujo con una concentración de sedimentos en volumen menor al 20 %, un flujo
74 hiperconcentrado es aquél cuya concentración de sedimentos es entre el 20 al 60 %,
75 mientras que un flujo de detrito es aquel cuya concentración de sedimentos es mayor al 60
76 % en volumen.

77 Un aluvión (*flash flood*) es un flujo particular de agua extremadamente veloz, muy cargado
78 de detritos, que corresponden con grandes episodios de descargas hidráulicas,
79 consecuencia de precipitaciones extraordinarias (Hungr et al. 2014), que según su

80 comportamiento y concentración final de detritos puede ser clasificado en los distintos tipos
81 de flujos descritos anteriormente.

82 Aunque cada tipo de flujos posee características únicas que lo distinguen de los demás, es
83 común que un tipo de flujo evolucione a otro según va adquiriendo o depositando el material
84 transportado a lo largo de su recorrido.

85 El sector seleccionado, un tramo precordillerano de la ruta N° 150, se caracteriza por
86 registrar eventos de torrencialidad como desencadenantes de inundaciones e importantes
87 flujos y volúmenes de agua, que afectan la infraestructura de transporte. En los últimos 20
88 años, en el sector de traza, se registraron numerosos PRM de gran magnitud, que
89 ocasionaron cuantiosos daños.

90 Entre los estudios de cuencas vinculados a la ocurrencia de PRM, pueden mencionarse los
91 de ([Esper Angillieri 2007, 2008, 2012, 2020](#), [Esper Angillieri y Perucca, 2014a,b](#), [Esper](#)
92 [Angillieri y Fernandez, 2017](#), [Esper Angillieri et al. 2016, 2017, 2020](#), [Perucca y Esper](#)
93 [Angillieri 2011](#)).

94 Para el presente trabajo se propone el análisis morfométrico de cuencas, el cálculo de
95 caudales máximos teóricos y un inventario de procesos de remoción en masa, con el objeto
96 de evaluar su ocurrencia como base para la selección de alternativas de un camino de
97 montaña. Los resultados obtenidos son de gran utilidad en el campo de las ciencias
98 aplicadas, aportando parámetros que permitan a través de organismos públicos y privados,
99 prevenir y/o mitigar los efectos que estos procesos ocasionan sobre las construcciones
100 civiles presentes y futuras. Además, asumen el rango de relevantes y prioritarios al entender
101 que el tramo de ruta considerado es el principal acceso al futuro túnel Internacional de Agua
102 Negra (frontera Argentina - Chile).

103

104

105

106

107 **ÁREA DE ESTUDIO**

108

109 El área de estudio se ubica en la porción centro norte de la provincia de San Juan,
110 departamentos Jáchal e Iglesia, aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad capital de
111 San Juan y comprende un sector de la Ruta Nacional N°150 en su tramo Pachimoco -
112 Cuesta del Viento, dentro del ámbito de Precordillera Occidental y Central (Fig. 1). La Ruta
113 Nacional 150 es el eslabón limítrofe en la Argentina del “corredor bioceánico central” que
114 une el océano Atlántico (Porto Alegre) con el Pacífico (Coquimbo), hecho que obliga a
115 prever en todo su recorrido las mejoras técnicas que fueren necesarias para que sus
116 características satisfagan el futuro tránsito internacional que lo demandará. Este tránsito
117 comercial de largo recorrido se hará presente a partir de la finalización del futuro Túnel
118 Internacional de Agua Negra.

119 **Clima**

120 En el sector seleccionado, el clima es árido tipo desértico, con valores medios de 121 mm
121 de precipitación anual, ningún mes supera los 20 mm, y son más probables en verano con
122 caída de granizo. Entre los meses de enero y febrero las precipitaciones son de corta
123 duración, pero de carácter torrencial, siendo las responsables de la generación de
124 importantes y veloces flujos con gran capacidad de carga. Los datos estadísticos de la
125 estación hidrometeorológica de Jáchal indican que las temperaturas oscilan entre los 28 °C
126 de enero, cuando las máximas superan los 36 °C y alcanzan los 44 °C absolutos, y los 8 °C
127 de julio, registrándose temperaturas por debajo de -9 °C. Los valores máximos de
128 precipitación se registran para Enero y Febrero, mientras los mínimos para Julio y Agosto.
129 Mientras que el valle de Rodeo – Iglesia se caracteriza por tener veranos moderados
130 condicionados por la altitud e inviernos fríos acompañados de nevadas poco frecuentes. La
131 temperatura mínima absoluta registrada fue de -14 °C y la máxima absoluta 36 °C,
132 verificándose mínimas por debajo de 0 °C de Marzo a Noviembre.

133

134 **Geografía**

135 En el sector de estudio, el relieve es montañoso, abrupto y recortado, rejuvenecido por
136 movimientos tectónicos que exponen roca sobre la superficie. Las elevaciones principales
137 son el Cerro Cuesta del Viento (1945 m s.n.m.), Cerro del Túnel (2376 m s.n.m.), Cerro
138 Negro (2425 m s.n.m.), Mogotes Quebraditas (2228 m s.n.m.), Cerro del Portezuelo (1516
139 m s.n.m.) y Cerro Viejo San Roque (1736 m s.n.m.). El área presenta características
140 hidrográficas de zonas andinas; los mayores caudales se obtienen en los meses de octubre
141 a marzo. La zona se caracteriza por un sistema de arroyos secundarios con orientaciones
142 predominantes sursuroeste-noreste, que en algunos casos siguen líneas de fracturas.
143 Son cauces en su mayoría intermitentes que drenan hacia el colector común, el río Blanco –
144 Jáchal. Estos ríos experimentan episódicos incrementos de caudales en el curso de la
145 estación veraniega, cuando las masas de aire húmedo del Pacífico al enfrentar a las
146 barreras orográficas, producen precipitaciones que, debido a la naturaleza de los terrenos y
147 a la pendiente pronunciada, escurren rápidamente hacia el colector en forma de avenidas
148 torrenciales que causan enormes perjuicios en la infraestructura vial e hidráulica.

149 **Geología**

150 Los afloramientos rocosos del área donde se emplaza la Ruta Nacional N°150 (tramo
151 Pachimoco, Jáchal – Cuesta del Viento, Iglesia) pertenecen al ámbito de la Provincia
152 geológica Precordillera (Bodenbender 1902). El tramo de ruta considerado atraviesa
153 perpendicularmente a la Precordillera Central y Occidental, que desde el punto de vista
154 estructural está representado por una faja plegada y corrida epidérmica de vergencia
155 oriental (Braccini 1946; Rolleri 1969). Este sector se encuentra afectado por la
156 subducción subhorizontal de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana,
157 característica que determina la migración del frente orogénico, hacia el este, la ausencia de
158 volcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca y la notable actividad neotectónica ubicada
159 principalmente en el frente orogénico (Ramos et al. 1986).

160 La Precordillera Central se corresponde con los depósitos de la plataforma calcárea
161 ordovícica. Con excepción de algunos depósitos calcáreos cámbricos en la primera lámina
162 oriental, la base de los corrimientos que caracterizan al sector central está formada por
163 rocas carbonáticas de plataforma de edad ordovícica temprana. Delgados depósitos
164 mayormente pelíticos del Silúrico y areniscas eodevónicas de ambiente marino somero se
165 apoyan en este sector en discordancia sobre las unidades anteriores. Depósitos marinos
166 turbidíticos correspondientes a la cuenca de antepaís del Devónico desarrollan un frente
167 deltaico que prograda desde el este al oeste. En aparente concordancia se apoyan las
168 sedimentitas neopaleozoicas correspondientes a depósitos continentales y marinos
169 someros.

170 En el sector occidental las facies de plataforma están ausentes y son reemplazadas por
171 facies clásticas de talud ordovícicas que contienen importantes olistolitos calcáreos
172 procedentes de la plataforma con fósiles del Cámbrico medio a Ordovícico inferior. Las
173 sedimentitas ordovícicas se intercalan con basaltos de naturaleza oceánica con típicas
174 lavas en almohadilla en el sector norte y central y están interpuestas tectónicamente en el
175 sector sur con una secuencia ofiolítica desmembrada con tectónitas basales ultrabásicas,
176 gabros estratificados, piroxenitas, diques en diques y lavas basálticas almohadilladas (Davis
177 *et al.* 1995; Haller y Ramos 1984). Los depósitos neopaleozoicos se asientan en marcada
178 discordancia angular sobre los eopaleozoicos. Están constituidos por facies marinas
179 dominantes, en las que se registran frecuentemente depósitos glaciarios de edad
180 carbonífera. Extensos conglomerados de edad pérmica constituyen los depósitos
181 neopaleozoicos más jóvenes.

182

183 **METODOLOGÍA**

184

185 La delimitación de las cuencas (Fig. 2) se realizó automáticamente en ambiente SIG
186 utilizando los algoritmos de dirección del flujo y acumulación de flujo con la ayuda de

187 modelos digitales de elevación con 30 m de resolución (ASTER GDEM V2-NASA 2011)
188 (Tachikawa et al. 2011). Las direcciones de flujo se calcularon usando el modelo de flujo de
189 dirección ocho (D8), que determina el flujo de cada celda de la cuadrícula a una de sus
190 ocho celdas adyacentes, en la dirección con una pendiente descendente más empinada. El
191 método D8 fue introducido primeramente por O'Callaghan y Mark (1984). La acumulación
192 de flujo, en su forma más simple, es el número de células de ladera que desembocan en
193 cada celda. Este método se basa en la suposición de que el flujo subsuperficial sigue la
194 topografía. Además, su delimitación fue comprobada a partir de la interpretación de
195 imágenes satelitales de alta resolución adquiridas a partir de Google Earth™ (SPOT 5 con
196 2,5m resolución espacial). Para cada una de las cuencas seleccionadas, se analizaron sus
197 parámetros morfométricos (Cuadro 1), los parámetros morfométricos obteniendo: área (A),
198 perímetro (P), longitud (L), ancho (W), longitud de cauce principal (Lcp); y parámetros
199 derivados: índice de compacidad (Kc), índice de circularidad (Rc), relación de elongación
200 (Re), factor de forma (Ff), entre otros. La longitud del cauce principal (Lcp) y la longitud de la
201 cuenca (L), fueron obtenidas de acuerdo con Schumm (1956).

202 Para el análisis de caudales se utilizaron registros meteorológicos aplicando el método
203 racional generalizado (Rühle 1966). La expresión genérica para calcular el caudal es:

$$204 \quad Q = \alpha \times \beta \frac{A \cdot C \cdot R_i}{K}$$

205 donde Q es el caudal o descarga, en (m³/s), α es un coeficiente, que tiene en cuenta la
206 influencia sobre el derrame, de la menor intensidad de la precipitación sobre el área, β es
207 un coeficiente, que tiene en cuenta la reducción del derrame por la retención del cauce, A
208 es el área de la cuenca (ha), C es el coeficiente medio de escorrentía, R es la intensidad de
209 las precipitaciones y K es un coeficiente para uniformar unidades.

210 Imágenes satelitales (SPOT 5 con 2.5 m de resolución espacial) utilizando Google Earth™;
211 trabajo de campo; imágenes satelitales ortorectificadas tomadas del basemap satellite
212 imagery de ArcGIS online (Esri 2014); modelos digitales del terreno ALOS PALSAR Global

213 Radar Imagery, <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/download-data/>) y tecnología
214 GIS (ESRI's ArcGis 10.3) fueron utilizadas para producir el inventario de flujos (Fig. 1).
215 Con el objeto de analizar la ocurrencia de procesos de remoción en masa de origen
216 principalmente climático (flujos) y generar una base para la selección de alternativas de
217 nuevas trazas, se han elaborado distintos mapas de variables (Fig. 3) condicionantes
218 derivadas de modelo digital del terreno (MDT); como Elevación (E), Pendiente (P),
219 Orientación (O), Radiación solar (RS), Índice de humedad topográficos (TWI), Stream power
220 index (SPI), Número de rugosidad de Melton (MRN), Sediment transport capacity index
221 (SL), Curvatura (C). El análisis se realizó para el área total en estudio, el área hacia el norte
222 del río Jáchal (donde las cuencas drenan de norte a sur) y el área hacia el sur del río
223 Jáchal, donde las cuencas drenan de sur a norte.
224 El mapa de Orientaciones fue reclasificado en 9 clases: plano (-1°), norte ($337.5^\circ-360^\circ$, $0^\circ-$
225 22.5°), noroeste ($22.5^\circ-67.5^\circ$), este ($67.5^\circ-112.5^\circ$), sureste ($112.5^\circ-157.5^\circ$), sur ($157.5^\circ-$
226 202.5°), suroeste ($202.5^\circ-247.5^\circ$), oeste ($247.5^\circ-292.5^\circ$) y noroeste ($292.5^\circ-337.5^\circ$). La
227 Radiación Solar (Fu y Rich 2002, Rich et al. 1994, Rich y Fu 2000) fue estimada para Enero
228 y Febrero de 2019. Los mapas de TWI (Moore et al. 1991), SPI (Wilson y Gallant 2000),
229 MRN (Melton 1965), SL (Guisan et al. 1999) y C (Wilson y Gallant 2000) fueron calculados
230 usando SAGA GIS (Conrad et al. 2015).
231 Para la confección del mapa geológico (Fig. 4) se utilizaron, como base de información, las
232 Hojas geológicas 3169-I Rodeo y 3169-II Jáchal del Servicio Geológico Minero Argentino
233 (SEGEMAR) a escala 1:250.000, que para la confección del mapa final, fue modificada y
234 actualizada principalmente de acuerdo a las investigaciones de los siguientes autores:
235 Benedetto y Vaccari (1992), Keller et al. (1994), Astini et al. (2000), Ré et al. (2003),
236 Colombo et al. (2005), Coturel y Gutierrez (2005), Perucca y Martos (2009), Suriano y
237 Limarino (2009), Sellés-Martínez y Azcurra (2010), Alonso (2011), Fazzito (2011), Suriano
238 et al. (2011), entre otros.

239

240 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

241

242 Se identificaron 192 cuencas que cubren una superficie de 544.21 km², con un perímetro de
243 131.55 km que se constituye como el área total en estudio. Hacia el norte de la ruta 150 se
244 identificaron 65 cuencas que drenan de norte a sur, estas cubren una superficie de 190.11
245 km², delimitando un sector norte con un perímetro de 73.02 km. Hacia el Sur, se delimitaron
246 127 cuencas que drenan de sur a norte, estas cubren una superficie de 354.10 km²,
247 delimitando un sector sur con un perímetro de 118.49 km. Para el presente, en base a sus
248 características principales y con el objeto de representar a la población total, sólo 22 de
249 ellas se seleccionaron para la representación de resultados morfométricos (Cuadro 2), 11
250 cuencas hacia el norte y 11 hacia al sur (Fig. 4).

251 La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Una cuenca
252 muy alargada, está menos sujeta a crecientes que una de la misma área y de forma más
253 redondeada o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el
254 escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (Horton 1932).
255 Además, el tamaño de una cuenca resulta una variable útil para diferenciar a aquellas
256 susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos debido a que estos se asocian
257 generalmente a cuencas pequeñas (Jackson *et al.* 1987, De Scally y Owens 2004, Wilford
258 *et al.* 2004). Más del 97 % (187 cuencas), de las cuencas totales poseen un área menor a
259 15 km².

260 Los índices relacionados a la forma (relación de elongación, factor de forma) indican
261 cuencas ligeramente alargadas (Cuadro 2). Los valores de razón de relieve (Rr), que
262 constituye la relación existente entre el desnivel de la cuenca y la longitud máxima de la
263 misma (Schumm 1956), varían 0.07 a 0.65 con valores medios de 0.20 para el sector norte
264 y 0.22 para el sur. Este índice se relaciona con la pérdida de sedimento, por lo que valores
265 altos (cercaos a 1) implica mayor capacidad erosiva (Sala y Gay 1981).

266 La relación de relieve (R), que se obtiene de la relación entre el desnivel absoluto y el
267 perímetro de la cuenca (Melton 1957) complementa el análisis y según (Senciales 1999)
268 este índice considera la presencia de importantes velocidades de caudales generalizadas,
269 debidas a la pendiente de la cuenca.

270 Los caudales obtenidos (Cuadro 2), para las diferentes cuencas, nos dan un indicio de la
271 susceptibilidad de cada cuenca a la ocurrencia de flujos o de cómo se comportaría ante las
272 eventuales precipitaciones de carácter torrencial. En una comparación entre ambos
273 sectores, puede verse que las cuencas del sector sur tienden a concentrar mayores
274 caudales para la misma precipitación teórica. Estos valores señalan alta probabilidad de
275 flujos con picos de caudales que superan, en algunos casos, los 100 m³/s. Además y
276 considerando la sinuosidad, un verdadero canal rectilíneo debiera tener una sinuosidad
277 igual a 1 y un típico canal meandriforme de 3 o más. Los ríos seleccionados poseen valores
278 desde 0.86 a 1.5, una sinuosidad de 1.5 es usualmente considerada la divisoria entre los
279 canales meandriformes y rectilíneos, por lo que se puede decir que la mayoría de los
280 canales son más rectilíneos que meandriformes, lo que sugiere una rápida evacuación del
281 agua en caso de tormentas que sumado a la gran disponibilidad de material sujeto a ser
282 removido, los convierte en susceptibles de generar importantes flujos.

283 Si bien la recopilación de eventos históricos resultó escasa y limitada, se ha logrado obtener
284 datos tomados de diarios digitales de la provincia, los cuales brindan información sobre el
285 sector seleccionado, y reflejan daños y pérdidas socio-económicas importantes,
286 ocasionadas por procesos aluvionales que descienden de las áreas montañosas. Algunos
287 de estos textos informativos corresponden a diarios locales, Dirección Nacional de Vialidad
288 y Departamento de Hidráulica (Cuadro 3).

289 Además, se han identificado las geoformas resultantes de PRM dentro de las cuales un total
290 de 116 están relacionadas a depósitos de flujos detritos y flujos hiperconcentrados de origen
291 netamente climático, relacionado a fuertes precipitaciones estacionales de carácter
292 torrencial. De estas 116 geoformas, 72 han sido identificadas en la margen sur del Río

293 Jáchal indicando, en un análisis a priori, que las cuencas que drenan desde el sur presentan
294 mayor susceptibilidad a la ocurrencia de estos procesos, alimentando los abanicos aluviales
295 existentes. La recopilación de eventos históricos mediante diarios de la provincia refleja
296 daños y pérdidas socio-económicas importantes, en la última década se han registrado 23
297 eventos históricos que afectaron la traza en mayor o menor medida (Cuadro 3).

298 El mapa de elevaciones (Fig. 3a) señala que las alturas en el área total de estudio van
299 desde los 1284 a los 3461, con una media de 2132 m s.n.m., los mismos valores máximos y
300 mínimos se obtuvieron para el sector norte las elevaciones pero con una media de 1955 m
301 s.n.m., mientras que para el sector sur las elevaciones mínimas son de 1282, las máximas
302 de 3429 y una media de 2227 m s.n.m. Estos resultados señalan que el sector sur es más
303 escarpado.

304 El análisis de pendientes es esencial en el estudio de la ocurrencia de procesos de
305 remoción en masa. En general se puede decir que pendientes suaves se relacionan con las
306 zonas de deposición de material, mientras que en zonas de pendientes pronunciadas
307 suelen asociarse a zonas de inicio de ocurrencia de PRM donde se favorecen el arranque y
308 movilización de material a las corrientes tributarias y de allí a la corriente principal. Las
309 pendientes máximas (Fig. 3b), tanto para el área total como para el sector norte, son del
310 orden de los 67°, con una media de 17°, mientras que para el sector sur las máximas no
311 superan los 65°.

312 El mapa de orientaciones (Fig. 3c), que fue reclasificado en 9 clases, señala que tanto para
313 el área total como para las áreas norte y sur la media de las laderas están orientadas hacia
314 el sur.

315 El mapa de Radiación Solar (Fig. 3d) indica que durante Enero y Febrero de 2019 algunos
316 sectores del área recibieron hasta 770 horas de sol directo, con mínimas de 396 horas y
317 una media de 667 horas, valores similares se obtuvieron en los sectores norte y sur, sin
318 embargo mediante análisis visual puede observarse que la ladera norte del río Jáchal posee
319 una mayor insolación que la sur, en general las laderas que sufren mayor insolación, son

320 más estables que aquellas más húmedas. Estos resultados señalan que el sector sur es
321 más inestable.

322 Los mapas de TWI (Fig. 3e) señalan que tanto para el área total como para los sectores
323 nortes y sur los valores mínimos son de aproximadamente 2, los máximos de 23, con una
324 media de 6. El índice de humedad TWI es una variable que define la tendencia de una celda
325 a acumular agua (Gruber y Peckham 2009). Está relacionada con la humedad del suelo y
326 refleja la tendencia de éste a generar escorrentía; relaciona la dirección y acumulación de
327 flujo, representadas por el área de captación o área de acumulación. Del análisis visual de
328 los mapas norte y sur, no se observa que este índice sea determinante para discriminar cual
329 es más susceptible a la ocurrencia de flujos.

330 Los mapas de SPI (Fig. 3f) nos dan un indicio de la capacidad erosiva del flujo en el punto
331 dado de la superficie topográfica (Moore et al. 1991). Las máximas, mínimas y medias
332 estadísticas de los mapas no brindan mayor información, sin embargo en el análisis visual
333 se observa una tendencia a mayor capacidad erosiva en el sector sur, resultado que infiere
334 que los procesos provenientes de esas cuencas tienen una mayor capacidad erosiva y
335 destructiva al incorporar mayor material en sus recorridos. Además, zonas con bajos
336 valores de SPI favorecen la depositación, favoreciendo la transición de flujos de detritos a
337 flujos con menores concentraciones de sedimentos (Marchi y Dalla Fontana 2005).

338 El índice de rugosidad de Melton (Fig. 3g) se utiliza para diferenciar las cuencas basándose
339 en la dinámica de sedimentos, es decir ayuda a diferenciar cuencas capaces de producir
340 flujos de detritos o flujos con menos contenido de material. Del análisis visual de los
341 sectores norte y sur se ve una marcada tendencia de valores mayores en el sector sur, lo
342 que señala que este sector es más susceptible a la ocurrencia de flujos con mayor carga de
343 material que el norte. La media del número de rugosidad de Melton (MRN), tanto para toda
344 el área como para los sectores norte y sur, es de <0.3 ; lo que indicaría cuencas más
345 susceptible a la ocurrencia de flujos con bajo contenido de material (Wilford et al. 2004), lo
346 que se contrapone con las evidencias geológicas del área donde se observan importantes

347 depósitos de flujos. Al analizar los valores de MRN obtenidos de la manera tradicional (la
348 razón entre el desnivel de la cuenca y el cuadrado del área) y categorizando las cuencas
349 según [Wilford et al. \(2004\)](#) se puede observar ([Gráfico 1](#)) que para el sector norte el 47.7 %
350 y 44.88 % del sur caen en la categoría 1 flujos de agua (cuencas con $MNR < 0,3$); el 10.77 %
351 del norte y 7.09 % del sur caen en la categoría 2 flujos hiperconcentrados (cuencas con
352 MNR entre 0.3 – 0.6 y $MNR > 0.6$ longitud de cuenca > 2.7 km) y el 41.53 % de las cuencas
353 norte y el 48.03% de las cuencas del sur caen en la categoría 3 flujos de detritos (cuencas
354 con $MNR > 0.6$ y longitud de cuenca < 2.7 km). Estos resultados corroboran las
355 observaciones de campo indicando una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de
356 detritos del sector sur.

357 Altos valores del índice de capacidad de transporte de sedimentos (SL), que es la distancia
358 entre el punto donde se origina el flujo y el punto donde es depositado el material, indican
359 mayor susceptibilidad del terreno a acumular mayores volumen de agua e incremento de
360 erosión. Este índice intenta registrar la capacidad erosiva de los arroyos en las distintas
361 cuencas producto de la acción erosiva del agua, actividad tectónica, deslizamientos o
362 cambios en el nivel de base ([Keller y Pinter 2002](#)). Del análisis visual de los sectores norte y
363 sur se ve una marcada tendencia de mayores valores en el sector sur, lo que señala que los
364 afloramientos de este sector son más susceptibles a la ocurrencia de flujos con mayor carga
365 de material que el norte ([Fig. 3h](#)). Los valores altos en sectores pedemontanos se deben a
366 los contactos litológicos entre rocas con erodabilidad diferente que ocasionan saltos de
367 agua, aumento de la potencia fluvial y posteriormente los procesos de erosión retrocedente
368 y concentrada liberan material que es arrastrado por los flujos descendentes.

369 El mapa de curvatura indica la tasa de cambio de la pendiente. Valores positivos describen
370 la curvatura convexa, valores negativos la curvatura cóncava, valores cercanos a cero
371 indican que la zona es plana o de pendiente rectilínea. En el terreno, la concavidad y
372 convexidad pueden estar asociadas con acumulaciones de flujo y dispersión de materiales.

373 El Plano de curvatura ([Fig. 3i](#)) es una medida de la convergencia o divergencia del flujo. Es

374 un indicativo del patrón de distribución del agua superficial y de materiales sólidos a través
375 de la dirección de la pendiente. Finalmente, la curvatura condiciona la ocurrencia de flujos
376 (Pradhan y Lee 2010).

377 Desde el punto de vista litológico (Fig. 2), en el sector, con excepción de algunos depósitos
378 calcáreos cámbricos, afloran delgados depósitos mayormente pelíticos del Silúrico y
379 areniscas eodevónicas, en aparente concordancia se apoyan las sedimentitas
380 neopaleozoicas correspondientes a depósitos continentales y marinos someros. En el sector
381 occidental las facies de plataforma están ausentes y son reemplazadas por facies clásticas
382 de talud ordovícicas que contienen importantes olistolitos calcáreos procedentes de la
383 plataforma con fósiles del Cámbrico medio a Ordovícico inferior. Las sedimentitas
384 ordovícicas se intercalan con basaltos de naturaleza oceánica con típicas lavas en
385 almohadilla en el sector norte y central y están interpuestas tectónicamente en el sector sur
386 con una secuencia ofiolítica desmembrada con tectónitas basales ultrabásicas, gabros
387 estratificados, piroxenitas, diques en diques y lavas basálticas almohadilladas. Los
388 afloramientos que más influyen en proveer material para la ocurrencia de PRM, incluyen a
389 depósitos coluviales de laderas escarpadas y a depósitos aluviales.

390 Para este estudio, se consideraron tres alternativas de traza de camino de montaña; #1
391 coincidente con el trazado actual de la ruta 150; #2 traza sobre barranca en la margen sur
392 del río Jáchal y #3 traza con sectores sobre la llanura de inundación actual del río Jáchal
393 (Fig. 1). Por cuestiones operativas relacionadas a la viabilidad geométrica y de
394 construcción de cada traza, las mismas poseen tramos coincidentes. Teniendo en cuenta
395 estas trazas, la traza #1 es afectada por 72 PRM (62 %), la #2 por 65 (56 %) y la #3 por 48
396 (41 %). En cambio sí solo se consideran los tramos de traza no coincidentes, la traza #1 y #2
397 son afectadas de igual modo por 32 PRM, mientras que la traza #3 solo por 8,
398 representando solo el 6,9 % de los procesos identificados.

399 Estos resultados sugieren, que las cuencas que drenan desde el sur presentan mayor
400 susceptibilidad a la ocurrencia de estos procesos y por consiguiente las alternativas que

401 presentan mayor susceptibilidad a la ocurrencia de PRM son la traza #1 y #2, con una
402 frecuencia prácticamente anual, indicando alta a muy alta peligrosidad.

403

404 **CONCLUSIONES**

405

406 El presente estudio muestra la aplicabilidad del análisis morfométrico de cuencas,
407 principalmente mediante la utilización del número de rugosidad de Melton y la longitud de la
408 cuenca para discriminar aquellas susceptibles a la ocurrencia de PRM. Y como
409 herramientas para la selección de alternativas de caminos de montaña, mediante el uso de
410 tecnologías de SIG. Además ofrece importante información de base para posteriores
411 estudios de susceptibilidad y/o peligrosidad a la ocurrencia de flujos destructivos. El análisis
412 morfométrico de las cuencas, el inventario de PRM, el cálculo de caudales y las variables
413 temáticas analizadas, sugieren una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de procesos del
414 sector sur respecto del norte. Resultados que nos permiten concluir que cualquier
415 alternativa de traza asociada al sector sur es más propensa a ser afectada que aquella
416 asociada al sector norte. Finalmente, la metodología aplicada resulta fácil de reproducir y
417 puede ser aplicada en otras regiones montañosas de similares características,
418 principalmente aquellas regiones donde la información hidrometeorológica y climática es
419 escasa o nula y no es posible efectuar otros cálculos.

420

421 **AGRADECIMIENTOS**

422

423 Se agradece al CIGEOBIO (CONICET-UNSJ) por los fondos aportados para la adquisición
424 de la licencia del software ArcGIS. Este trabajo de investigación ha sido financiado por el
425 proyecto CICITCA 21/I1275.

426

427

428 **REFERENCIAS**

429

430 Alonso, M.S. 2011. Estratigrafía, sistemas depositacionales y aspectos composicionales del
431 relleno neógeno de la cuenca Rodeo-Iglesia, San Juan, Argentina. Universidad de Buenos
432 Aires: 338 p. Buenos Aires.

433 Astini, R.A., Brussa, E.D., Mitchell, C.E. 2000. Revisión estratigráfica y consideraciones
434 paleogeográficas de la tectofacies occidental de la Precordillera argentina. Revista de la
435 Asociación Geológica Argentina 55 (4): 78-386.

436 Benedetto, J.L. y Vaccari, N.E. 1992. Significado estratigráfico y tectónico de los complejos
437 de bloques resedimentados cambro-ordovícicos de la Precordillera occidental, Argentina.
438 Estudios Geológicos 48 (5-6): 305-313.

439 Bodenbender, G. 1902. Contribución al conocimiento de la Precordillera y de las Sierras
440 Centrales de la República Argentina. Academia Nacional de Ciencias 18: 203-264.

441 Braccacini, O. 1946. Contribución al conocimiento geológico de la Precordillera Sanjuanino-
442 Mendocina. Boletín de Informaciones Petroleras 258: 258-264.

443 Colombo, F., Limarino, C., Busquets, P., Solé De Porta, N., Heredia, N., Rodríguez-
444 Fernández, R., Alvarez-Marrón, J. 2005. Primeras edades absolutas de los depósitos
445 lacustres holocenos del río Jáchal, Precordillera de San Juan. Revista de la Asociación
446 Geológica Argentina 60 (3): 605-608.

447 Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J.,
448 Wichmann, V. y Böhrner, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v.
449 2.1.4. Geoscientific Model Development 8: 1991-2007.

450 Costa, J.E. 1988. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods,
451 hyperconcentrated flows, and debris flows. En: Baker VR, Kochel RC, P.P. (eds.), Flood
452 geomorphology. John Wiley & Sons, 113-122. New York.

453 Coturel, E.P. y Gutierrez, P. 2005. La megafloora de la Formación Tupe (Carbonífero
454 Superior-Pérmico Inferior), en la Mina La Delfina, San Juan, Argentina*. Revista del Museo

455 Argentino de Ciencias Naturales nueva serie 7 (1): 17-29.

456 Davis, J.S., Moores, E.M., Roeske, S.M., Kay, S.M., McClelland, W.C., Snee, L.W. 1995.

457 New data from the western margin of Precordillera Terrane, Argentina: constrain scenarios

458 for the middle Paleozoic tectonics of western South America. Laurentian-Gondwanan

459 connections before Pangea Field Conference, Program with Abstracts: 15-16.

460 Esper Angillieri, M.Y. 2007. The flash flood of the 13th of February of 1944 in the Quebrada

461 del Carrizal, Departamento Iglesia, province of San Juan. Revista de la Asociacion

462 Geologica Argentina 62 (2).

463 Esper Angillieri, M.Y. 2008. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood

464 hazard, San Juan, Argentina. Environmental Geology 55 (1): 107-111.

465 Esper Angillieri, M.Y. 2012. Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to

466 the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina. Quaternary International 253: 74-

467 79.

468 Esper Angillieri, M.Y. 2020. Debris flow susceptibility mapping using frequency ratio and

469 seed cells, in a portion of a mountain international route, Dry Central Andes of Argentina.

470 Catena 189.

471 Esper Angillieri, M.Y. y Fernandez, O.M. 2017. Morphometric analysis of river basins using

472 GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison

473 between manual and automated delineation of basins. Revista Mexicana de Ciencias

474 Geológicas 34 (2): 150-156.

475 Esper Angillieri, M.Y. y Perucca, L.P. 2014a. Geomorphology and morphometry of the de La

476 Flecha river basin, San Juan, Argentina. Environmental Earth Sciences 72 (8): 3227-3237.

477 Esper Angillieri, M.Y. y Perucca, L. 2014b. Morphometric characterization of the Rio Seco

478 basin concerning strong rainfall in 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina.

479 Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana 66 (2): 235-245.

480 Esper Angillieri, M.Y., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L., Rothis, M. 2016. Basin morphometry

481 as basis in assessing flash flood susceptibility/hazard, case study: Del agua river Basin, San

482 Juan, Argentina. *Revista de la Asociacion Geologica Argentina* 73 (4): 513-519.

483 Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L., Vargas, N. 2017. Catastrophic flash flood triggered by an
484 extreme rainfall event in El Rodeo village, January 2014. Northwestern Pampean Ranges of
485 Argentina. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 99 (1): 72-84.

486 Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L., Vargas, N. 2020. Spatial and temporal analysis of debris
487 flow occurrence in three adjacent basins of the western margin of Grande River: Quebrada
488 de Humahuaca, Jujuy, Argentina. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*.

489 Esri. 2014. ArcGIS Desktop: Release 10.3. Redlands.

490 Fazzito, S.Y. 2011. Estudios geofísicos aplicados a la neotectónica de la falla El Tigre,
491 precordillera de San Juan. Universidad de Buenos Aires: 291 p.

492 Fu, P. y Rich, P.M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture
493 and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture* 37 (1-3): 25v - 35.

494 Gruber, S. y Peckham, S. 2009. Land-surface parameters and objects in hydrology. *In*
495 *Developments in Soil Science*. 171-194.

496 Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant
497 species distribution. *Plant Ecology* 143: 107-122.

498 Haller, M. y Ramos, V. 1984. Las ofiolitas famatinianas (Eopaleozoico) de las provincias de
499 San Juan y Mendoza. *Actas 9º Congreso Geológico Argentino* 2: 66-83.

500 Horton, R.E. 1932. Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical*
501 *Union* 13: 350-361.

502 Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of
503 landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7 (3): 221-238.

504 Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an
505 update. *Landslides* 11: 167-194.

506 Jackson, L.E., Kostaschuk, R.A., MacDonald, G.M. 1987. Identification of debris flow hazard
507 on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. *GSA Reviews in Engineering Geology* 7:
508 115-124.

509 Keller, M., Cañas, F., Lehnert, O., Vaccari, N.E. 1994. The Upper Cambrian and Lower
510 Ordovician of the Precordillera (Western Argentina): Some stratigraphic reconsideration.
511 Newsletter in Stratigraphy 31: 115-132.

512 Keller, E. y Pinter, N. 2002. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape. 2nd
513 Revise (Pearson, editor). Books in the Prentice Hall Earth Science Series: 384 p.

514 Marchi, L. y Dalla Fontana, G. 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of
515 sediment dynamics in mountain basins. Environmental Geology 48 (2): 218-228.

516 Melton, M.A. 1957. An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface
517 Properties, and Geomorphology, Office of Naval Research Technical Report No. 11. Dept. of
518 Geology, Columbia University: 102 p. New York.

519 Melton, M. 1965. The Geomorphic and Palaeoclimatic Significance of Alluvial Deposits in
520 Southern Arizona. Journal of Geology 73: 1-38.

521 Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: A review of
522 hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes 5 (1).

523 O'Callaghan, J.F. y Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital
524 elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 28: 328 - 344.

525 Perucca, L.P. y Esper Angillieri, M.Y. 2011. Morphometric characterization of del Molle Basin
526 applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina.
527 Quaternary International 233: 81-86.

528 Perucca, L.P. y Martos, L.M. 2009. Análisis preliminar de la evolución del paisaje
529 cuaternario en el valle de Iglesia, San Juan. Revista de la Asociacion Geologica Argentina
530 65 (4): 624-637.

531 Pradhan, B. y Lee, S. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis:
532 backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and
533 bivariate logistic regression modelling. Environmental Modelling and Software: 747-759.

534 Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortés, J.M.,
535 Palma, M. 1986. Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. Tectonics 5 (6):

536 855-880.

537 Ré, G.H., Jordan, T.E., Kelley, S. 2003. Cronología y paleogeografía del Terciario de la
538 Cuenca Intermontana de Iglesia septentrional, Andes de San Juan, Argentina. Revista de la
539 Asociación Geológica Argentina 58 (1): 31-48.

540 Rich, P.M., Dubayah, R., Hetrick, W.A., Saving, S.C., Dubayah, R.O. 1994. Using Viewshed
541 Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. American Society
542 for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers: 524-529.

543 Rich, P.M. y Fu, P. 2000. Topoclimatic Habitat Models. 4th International Conference on
544 Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research
545 Needs: 14.

546 Roller, E.. 1969. Rasgos tectónicos generales del valle de Matagusanos y de la zona entre
547 San Juan y Jocolí, Provincia de San Juan, República Argentina. Revista de la Asociación
548 Geológica Argentina 24 (4): 408-412.

549 Rühle, F. 1966. Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas.
550 La Ingeniería. Centro Argentino de Ingenieros 987.

551 Sala, M. y Gay, R. 1981. Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. Notes de
552 Geografía Física 4: 41-65.

553 De Scally, F.A., Owens, I.F. 2004. Morphometric controls and geomorphic responses on
554 fans in the Southern Alps, New Zealand. Earth Surface Processes and Landforms 29: 311 -3
555 22.

556 Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy,
557 New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America 67: 597-646.

558 Sellés-Martínez, J. y Azcurra, D. 2010. Estructura del Paleozoico inferior en las nacientes
559 del río Jachal, Provincia de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 66 (1):
560 80-93.

561 Senciales, J.M. 1999. Redes fluviales. Metodología de Análisis. Universidad de Málaga,
562 Estudios y Ensayos: 337 p.

563 Suriano, J., Alonso, M.S., Limarino, C.O., Tedesco, A.M. 2011. La formación cuesta del
564 viento (nov. nom.): Una nueva unidad litoestratigráfica en la evolución del orógeno
565 precordillerano. Revista de la Asociación Geológica Argentina 68 (2): 246-260.

566 Suriano, J. y Limarino, C.O. 2009. Sedimentación pedemontana en las nacientes del río
567 jáchal y pampa de gualilán, precordillera de San Juan. Revista de la Asociación Geológica
568 Argentina 65: 516-532.

569 Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D.B., Oimoen, M.J., Zhang, Z., Danielson, J.J.,
570 Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Carabajal, C. 2011. ASTER Global Digital
571 Elevation Model Version 2 - Summary of Validation Results. Japan Space Systems: 27 p.

572 Wilford, D.J., Sakals, M.E., Innes, J.L., Sidle, R.C., Bergerud, W.A. 2004. Recognition of
573 debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. Landslides 1
574 (1): 61-66.

575 Wilson, J.P. y Gallant, J.C. 2000. Primary topographic attributes. Terrain Analysis: Principles
576 and Applications.

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

Figura 1. a) Ubicación área de estudio respecto a la Provincia de San Juan. b) Alternativas de traza en líneas blancas e Inventario de PRM en rombos verdes y amarillos. c) Cuencas seleccionadas para el análisis morfométrico.

Figura 2. Mapa geológico del área.

Figura 3. Variables de estudio.

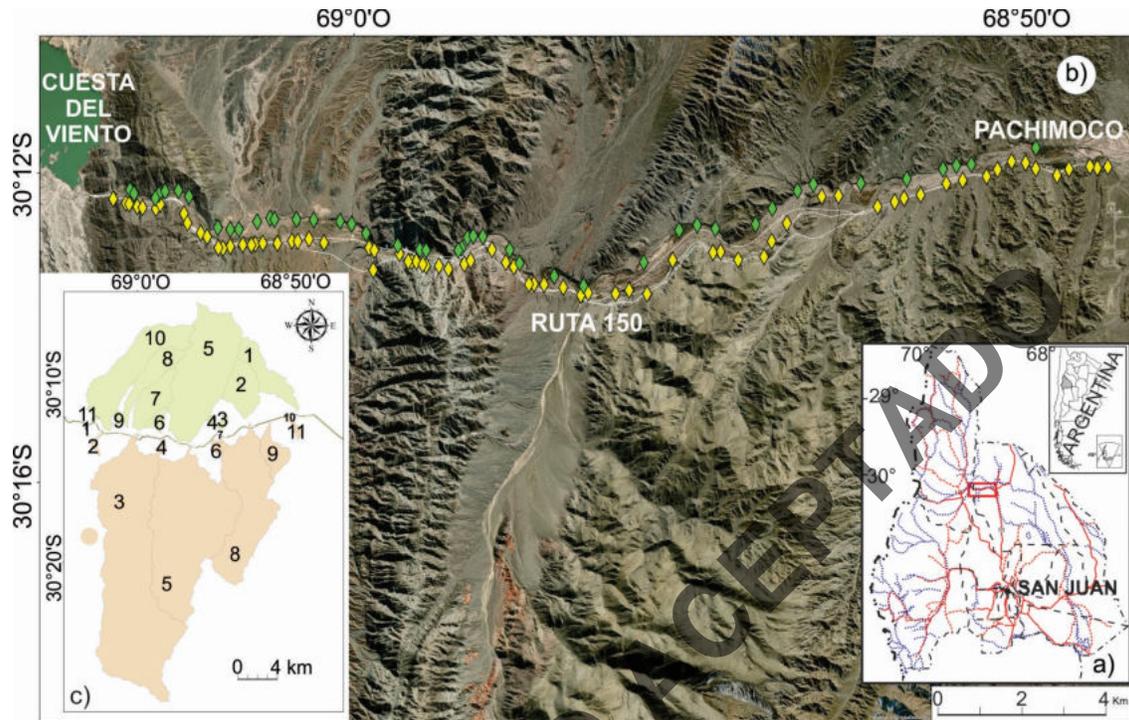
Tabla 1. Índices morfométricos.

Tabla 2. Parámetros morfométricos de las cuencas seleccionadas.

Tabla 3. Inventario histórico

Gráfico 1. MRN vs Longitud de cuencas. Categorización de [Wilford et al. \(2004\)](#), 1 flujos de agua (cuencas con $MNR < 0,3$); 2 flujos hiperconcentrados (cuencas con $MNR 0,3 - 0,6$ y $MNR > 0,6$ longitud de cuenca > 2.7 km) y 3 flujos de detritos (cuencas con $MNR > 0,6$ y longitud de cuenca < 2.7 km).

Figura 1. a) Ubicación área de estudio respecto a la Provincia de San Juan. b) Alternativas de traza en líneas blancas e Inventario de PRM en rombos verdes y amarillos. c) Cuencas seleccionadas para el análisis morfométrico.



MANUSCRITO

Figura 2. Mapa geológico del área. **FLI**: La Laja, **Oit**: Olistolitos Los Túneles, **FLf**: La Flecha, **FSj**: San Juan, **FLs**: Los Sombreros, **FLa**: Los Azules, **FYI**: Yerba Loca, **FA**: Alcaparrosa, **CIB**: Cuerpo Ígneo Básico, **FLch**: La Chilca, **FE**: Los Espejos, **FTa**: Talacasto, **FPn**: Punta Negra, **FT**: Tupe, **FP**: Patquia, **FV**: Vallecito, **FLc**: Lomas del Campanario, **FLf**: Las Flores, **FPIf**: Puesto La Flecha, **FCv**: Cuesta del Viento, **FR**: Rodeo, **Aa**: aluviales, **Dr**: Dep. recientes.

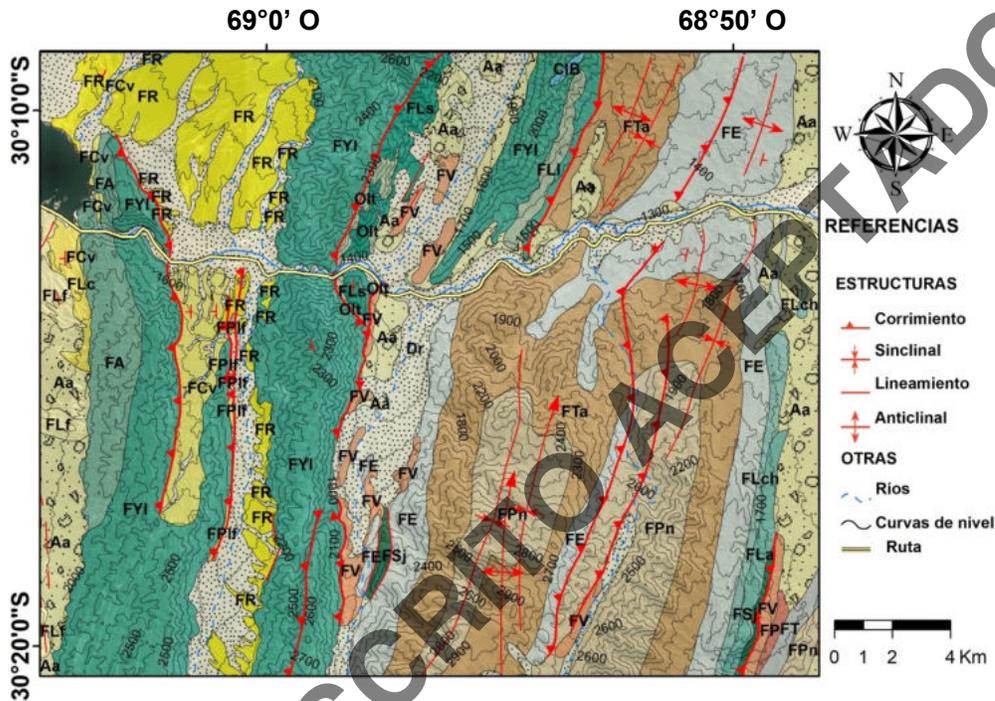
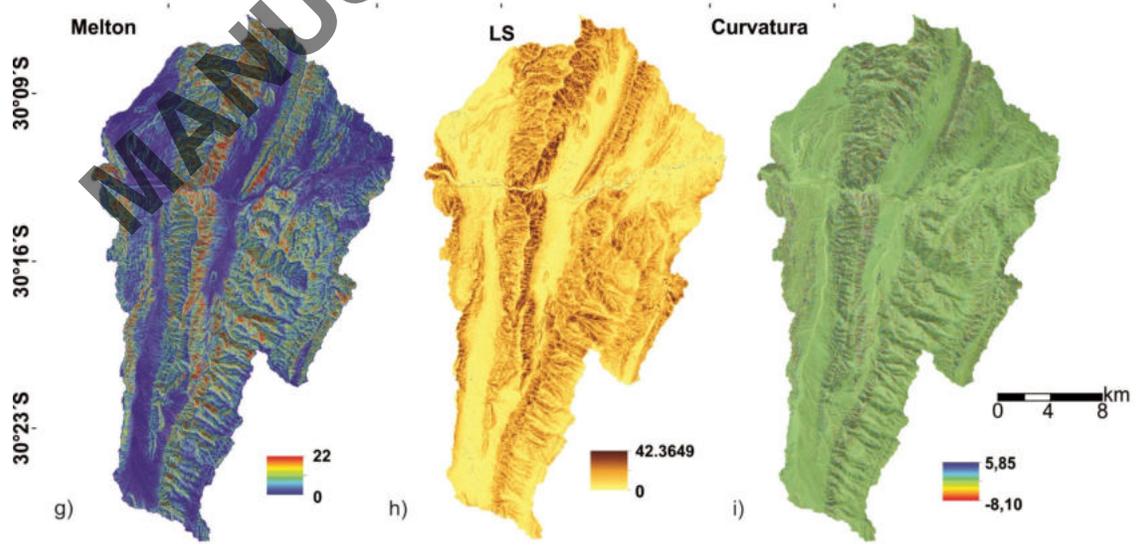
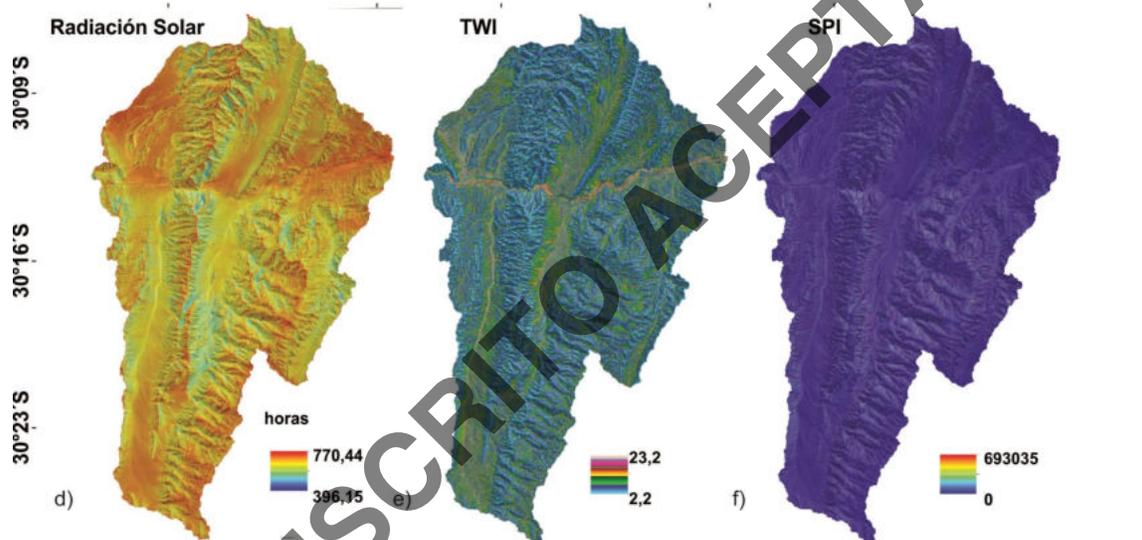
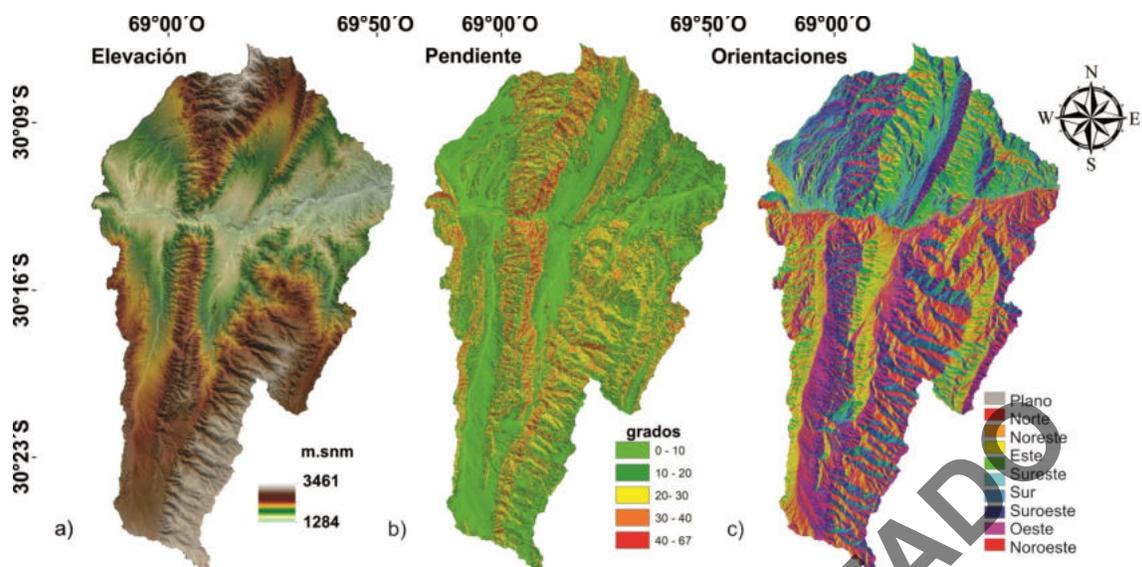


Figura 3. Variables de estudio.

MANUSCRITO ACEPTADO



Cuadro 1. Índices morfométricos.

Índice	Formula	Cita
<i>Relación de elongación</i>	$Re = (\sqrt{4A/\pi})/L$	(Schumm 1956)
<i>Factor de forma</i>	$Ff = A/L^2$	(Horton 1932)
<i>Sinuosidad del cauce</i>	$S = Lcp/L$	(Schumm 1977)
<i>Ancho medio</i>	$Wm = A/L$	
<i>Desnivel de cuenca</i>	$Hr = H - h$	(Hadley y Schumm 1961)
<i>Razón de relieve</i>	$Rr = Hr/L$	(Schumm 1956)
<i>Relación de relieve</i>	$R = Hr/P$	(Melton 1957)
<i>Número de rugosidad de Melton</i>	$MRN = Hr/A^{0.5}$	(Melton 1957)

MANUSCRITO ACEPTADO

Cuadro 2. Parámetros morfométricos de las cuencas seleccionadas.

Cuenca	A [km ²]	P [km]	L [m]	Lcp [m]	Re	Ff	S	Wm [m]	Hr [m]	Rr	R	MRN	Q [m ³ /s]	
NORTE	1	14.336	23.921	8417.977	9507.838	0.508	0.202	1.129	1703.023	1176	0.140	0.049	0.311	33.30
	2	14.491	17.060	6368.614	7005.284	0.674	0.357	1.100	2275.402	982	0.154	0.058	0.258	38.20
	3	0.968	4.486	1535.363	1811.920	0.723	0.411	1.180	630.766	135	0.088	0.030	0.137	3.59
	4	0.683	3.884	1393.304	1445.096	0.669	0.352	1.037	490.171	393	0.282	0.101	0.476	3.63
	5	61.402	39.712	14340.342	15296.145	0.617	0.299	1.067	4281.783	1842	0.128	0.046	0.235	121.59
	6	2.781	8.396	2562.347	3591.400	0.734	0.424	1.402	1085.488	774	0.302	0.092	0.464	10.08
	7	13.375	18.731	7225.559	8533.104	0.571	0.256	1.181	1851.063	1017	0.141	0.054	0.278	32.02
	8	13.611	23.999	9443.634	10746.075	0.441	0.153	1.138	1441.295	1244	0.132	0.052	0.337	30.02
	9	0.640	4.092	1783.483	1549.205	0.506	0.201	0.869	358.951	145	0.081	0.035	0.181	2.31
	10	37.679	38.085	13469.422	16291.659	0.514	0.208	1.210	2797.379	1551	0.115	0.041	0.253	59.97
	11	0.110	1.360	485.202	512.682	0.771	0.467	1.057	226.469	317	0.653	0.233	0.956	1.22
SUR	1	0.111	1.398	556.821	565.639	0.674	0.357	1.016	198.814	292	0.524	0.209	0.878	0.94
	2	0.825	6.265	2499.270	2837.280	0.410	0.132	1.135	329.919	813	0.325	0.130	0.895	4.16
	3	140.850	76.666	27236.126	32147.170	0.492	0.190	1.180	5171.425	1887	0.069	0.025	0.159	215.38
	4	1.111	4.753	1929.261	2176.336	0.616	0.298	1.128	575.785	898	0.465	0.189	0.852	8.55
	5	99.652	53.808	18021.752	21966.260	0.625	0.307	1.219	5529.542	1618	0.090	0.030	0.162	200.93
	6	1.640	5.982	1875.591	2311.126	0.770	0.466	1.232	874.231	549	0.293	0.092	0.429	8.39
	7	0.222	2.297	757.823	887.417	0.701	0.386	1.171	292.865	317	0.418	0.138	0.673	2.38
	8	54.550	48.159	16572.234	25104.580	0.503	0.199	1.515	3291.666	1207	0.073	0.025	0.163	93.03
	9	8.088	16.167	5719.418	5955.303	0.561	0.247	1.041	1414.175	602	0.105	0.037	0.212	21.39
	10	0.268	2.379	842.951	1012.936	0.693	0.377	1.202	318.201	126	0.149	0.053	0.243	1.77
	11	1.049	5.978	2126.286	2526.806	0.544	0.232	1.188	493.346	397	0.187	0.066	0.388	5.22

Cuadro 3. Inventario histórico

Fecha	Descripción daños e inconvenientes por lluvias torrenciales	Fuente
10/12/2007	Corte parciales en distintos sectores	Diario de Cuyo
16/11/2008	Tramo Jáchal-Iglesia totalmente inhabilitada	Diario de Cuyo
21/01/2009	Daños importante en calzada, corte total de la traza entre los kms 262-263	Vialidad
23/02/2011	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
04/03/2011	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
05/05/2011	Daños importante en calzada, corte total de la traza	Vialidad
18/01/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Tiempo de San Juan
19/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
23/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
24/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
21/01/2013	Derrumbes y material de arrastre (traza intransitable por varios días)	Diario de Cuyo
08/02/2013	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
24/03/2013	Daños importante en calzada, corte total de la traza km 256	Vialidad
26/12/2013	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
01/12/2014	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
06/02/2015	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza. Obras de drenaje obstruidas	Vialidad
10/05/2016	Derrumbes a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
03/02/2017	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
02/12/2017	Derrumbes, material de arrastre y obras de drenaje obstruidas y/o dañadas	La Séptima
28/02/2018	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
26/01/2019	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	SanJuan8.com
02/04/2019	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Jáchal Magazine
17/03/2020	Derrumbes, corte total de la traza km 262	13 San Juan

Gráfico 1. MRN vs Longitud de cuencas. Categorización de [Wilford et al. \(2004\)](#), 1 flujos de agua (cuencas con $MNR < 0,3$); 2 flujos hiperconcentrados (cuencas con $MNR 0,3 - 0,6$ y $MNR > 0,6$ longitud de cuenca $> 2,7$ km) y 3 flujos de detritos (cuencas con $MNR > 0,6$ y longitud de cuenca $< 2,7$ km).

