



Estudio preliminar de caídas de rocas y factores condicionantes asociados al sismo 6.4 Mw de Enero de 2021, San Juan, Argentina

Carla E. GINESTA TORCIVIA^{1,2}, Natalia N. RIOS^{1,2}, Valeria CORTEZ TAILLANT^{1,3} Flavia TEJADA RECABARREN² y María Yanina ESPER ANGILLIERI^{1,4}

¹Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biosfera, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de San Juan (CIGEOBIO, UNSJ-CONICET). ginestageo@gmyaninaesper@gmail.com; natalia_noemi_rios@hotmail.com; valeriasofia1292@gmail.com

²Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO). Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. flaviatejada@gmail.com

³Gabinete de Geología Ambiental (INGEO). Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.

⁴Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Universidad Nacional de San Juan.

Emails: ginestageo@gmail.com

Editor: Francisco E. Córdoba

Recibido: 29 de junio de 2021

Aceptado: 17 de noviembre de 2021

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un inventario preliminar de las caídas de rocas generadas a partir del sismo de magnitud 6.4 Mw, ocurrido el 18 de Enero en San Juan, Argentina. Se identificaron 507 caídas de rocas, entre nuevas y reactivadas. Se trabajó en una plataforma de Sistema de Información Geográfico con imágenes satelitales *Landsat*, complementando con observaciones de campo. Se estudiaron los factores condicionantes de ocurrencia (pendientes, litología, comportamiento neotectónico, entre otros). La vulnerabilidad de la construcción de obras civiles afectadas se evaluó mediante observación directa. Se observó que la mayor concentración de desprendimientos se ubicó a 60 km con dirección norte, en promedio, del foco sísmico y su mayoría se ubicó en laderas con pendiente hacia el este. El 96.6 % de los procesos se observaron en rocas sedimentarias pertenecientes a las Formaciones Punta Negra, San Juan, La Dehesa, entre otras, y el 0.4 % restante en rocas volcánicas. Todas estas litologías están altamente meteorizadas, falladas y diaclasadas. Los tamaños de los bloques caídos son variados, se reconocen desde pocos centímetros hasta el metro cúbico. Los motivos principales que desencadenan las caídas de rocas se deberían a los factores condicionantes como pendientes, orientación de laderas y litologías.

Palabras clave: Terremoto, deslizamientos gravitatorios, inventario, Cuyo.

ABSTRACT

Preliminary study of rock falls and conditioning factors associated with the Mw 6.4 earthquake, January 2021, San Juan, Argentina.
The objective of the following paper was to carry out a preliminary inventory of the rock falls generated by the earthquake of January 18, of magnitude 6.4 Mw, in San Juan province, Argentina. 507 rock falls were recorded, between new and reactivated. It worked in a Geographical Information System environment, from Landsat satellite images, with field observations. The determinants occurrence factors were studied (slope, lithology, neotectonic behavior, and others). The building vulnerability affected was evaluated by direct observation. It observed that the highest concentration of landslides was located 60 km to the north, on average, of the seismic focus and most of them were located on east-facing slopes. Landslides were located 96.6 % in sedimentary rock (Punta Negra Formation, San Juan Formation, La Dehesa, among others) and 0.4 % (Volcanic Rock). All rock fall were highly weathered, faulted and jointed.

The rock fall sizes were ranging varied from a few cubic centimeters to meters. The main reasons that triggered the landslides would be due to determinants occurrence factors such as slopes, aspects and lithologies.

Keywords: Earthquake, gravity landslides, inventory, Cuyo.

INTRODUCCIÓN

El 18 de Enero de 2021 a las 23:46 horas (UTM -3) tuvo lugar un sismo de magnitud 6.4 Mw, con epicentro en 31.85° latitud sur - 68.96° longitud oeste, a 57 km al suroeste de la ciudad de San Juan, Argentina. El mismo se produjo a 8 km de profundidad (INPRES 2021) y se percibió en casi toda la provincia, así como en provincias limítrofes (Mendoza, La Rioja, San Luis), en Córdoba y en Chile.

Los procesos de remoción en masa co-sísmicos son aquellos detonados por sismos de gran magnitud, debido al aumento del esfuerzo cortante, a la disminución de resistencia por el aumento de la presión de poros y a la deformación del suelo asociado a la onda sísmica. Las laderas caen o fallan, debido a que la aceleración gravitacional y sísmica provoca cortas tensiones que superan la fuerza combinada de cohesión y fricción, entre la roca subyacente y los suelos (Meunier et al. 2007).

Los principales factores condicionantes que contribuyen a la ocurrencia de estos procesos, se relacionan con las características litológicas (e.g. variaciones de meteorización y permeabilidad de la roca) y morfológicas del relieve (e.g. erosión basal, depósitos de sobrecarga de laderas, presencia de cizallas), la estructura y propiedades físicas de las rocas aflorantes, factores tenso - deformativos, la densidad de la cobertura vegetal, entre otros. Los factores detonantes más frecuentes son la intensidad de lluvias diarias, sismos, aplicación de cargas estáticas o dinámicas y modificación geométrica de las pendientes (Varnes 1978, Cruden 1991, Hauser 2000).

Numerosos autores han estudiado los procesos de remoción en masa inducidos por sismos tales como: Plafker et al. (1971), Harp et al. (1981, 1984), Keefer (1984), Owen et al. (2008), Fauqué et al. (2006, 2008), Cortés Granados (2010), Jiménez Jara (2011), Mardones Flores y Rojas Hernández (2012), Guzmán Marín et al. (2015), Junquera-Torrado et al. (2019, 2021), Acosta et al. (2021); en Argentina y otros lugares del mundo. Los mismos reconocen la importancia de identificar estos procesos para lograr una mejor gestión territorial y disminuir las amenazas que significan para la población y las obras civiles.

Los estudios basados en inferir vínculos entre la generación de procesos de remoción en masa como una función de

eventos sísmicos a través de relaciones estadísticas (Keefer 1984, 1994, 2002, Rodríguez et al. 1999, Malamud et al. 2004) muestran que el número y tamaño de los procesos disminuyen a medida que la distancia desde la ruptura de la falla aumenta. En términos corticales superficiales, el número de procesos, el volumen y el área afectada, son directamente proporcionales a la magnitud del sismo.

Para sismos de subducción, Serey et al. (2019) sugieren que el número de deslizamientos generados es menor que los detonados por sismos corticales superficiales. Estas observaciones sugieren que los patrones regionales de procesos de remoción en masa co-sísmicos podrían reflejar las propiedades de sus sismos desencadenantes, así como la disipación de la energía sísmica y la atenuación de las ondas sísmicas (Meunier et al. 2007).

Los datos observados por Keefer (2002) muestran que los sismos corticales superficiales de magnitud moderada pueden producir un gran número de procesos de remoción en masa. Generalmente el número de los mismos asciende a medida que aumenta la magnitud del sismo y Keefer (1984) observó además que los procesos de remoción en masa predominan en los sismos inventariados desde 1980, al igual que en los sismos anteriores.

En el sector sur de los Andes Centrales los grandes sismos de la corteza superficial son el mecanismo más aceptado para explicar la génesis de los grandes deslizamientos y avalanchas (Hermanns y Strecker 1999, Fauque et al. 2000, Hermanns et al. 2001, Moreiras 2006, González Díaz et al. 2006, Antinao y Gosse 2009, Penna et al. 2011, Esper Angillieri y Perucca 2013, Moreiras y Sepúlveda 2015, entre otros). Esta hipótesis se basa en el estrecho vínculo entre la distribución de los deslizamientos y las principales fallas regionales, asumiendo una relación entre ellos y la reciente actividad tectónica de las fallas locales.

El presente estudio tiene como finalidad realizar un inventario de caídas de rocas co- sísmicas y el análisis de sus consecuencias a sobre las infraestructuras humanas.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio abarca un área aproximada de 15363 km², en la provincia de San Juan, Argentina. Está limitada en-

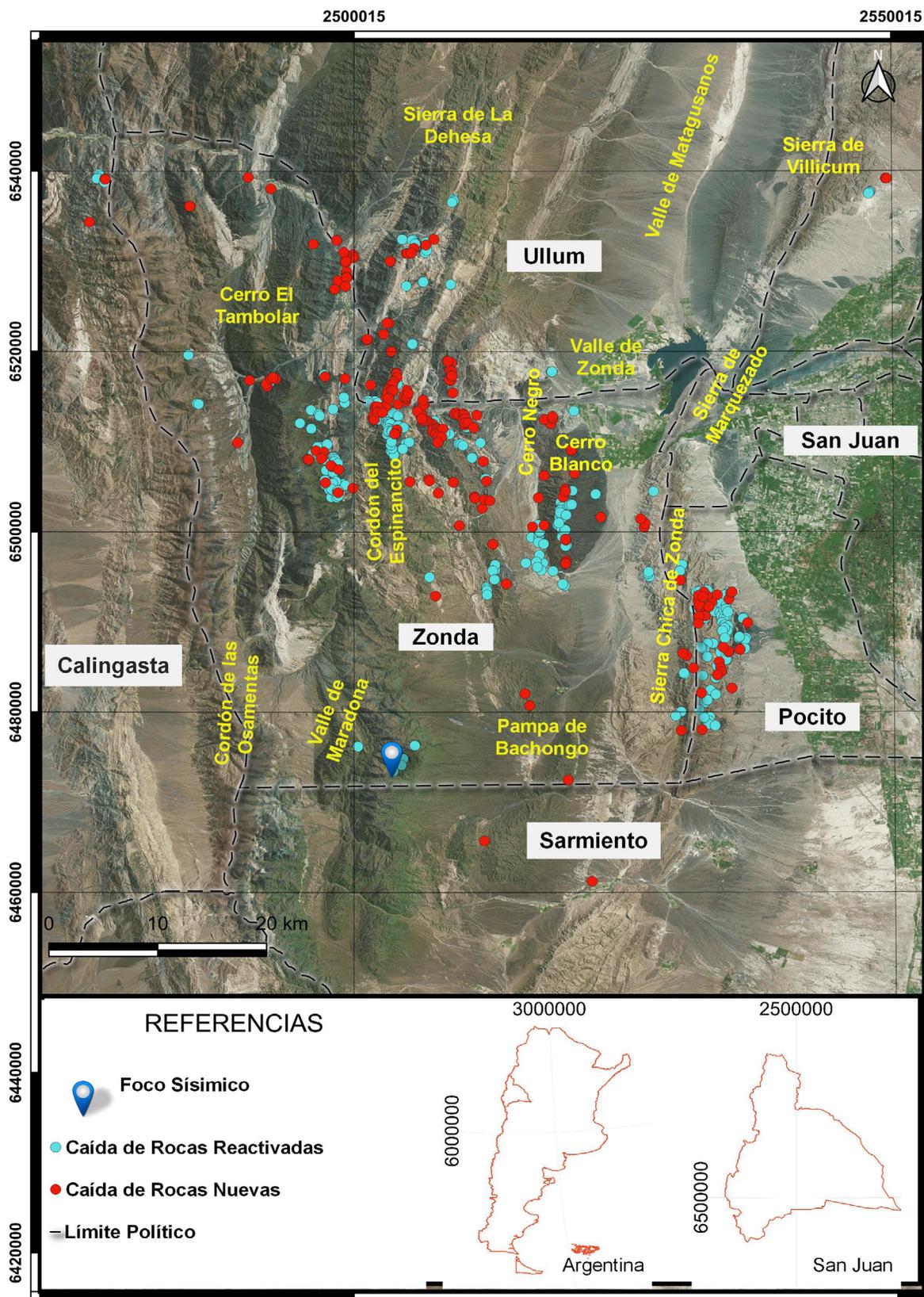


Figura 1. Ubicación del área de estudio con imagen satelital *Digital Globe-WorldView-4* de 30 cm de resolución de fondo. Se visualizan las caídas de rocas inventariadas (nuevas y reactivadas), y los límites políticos departamentales.

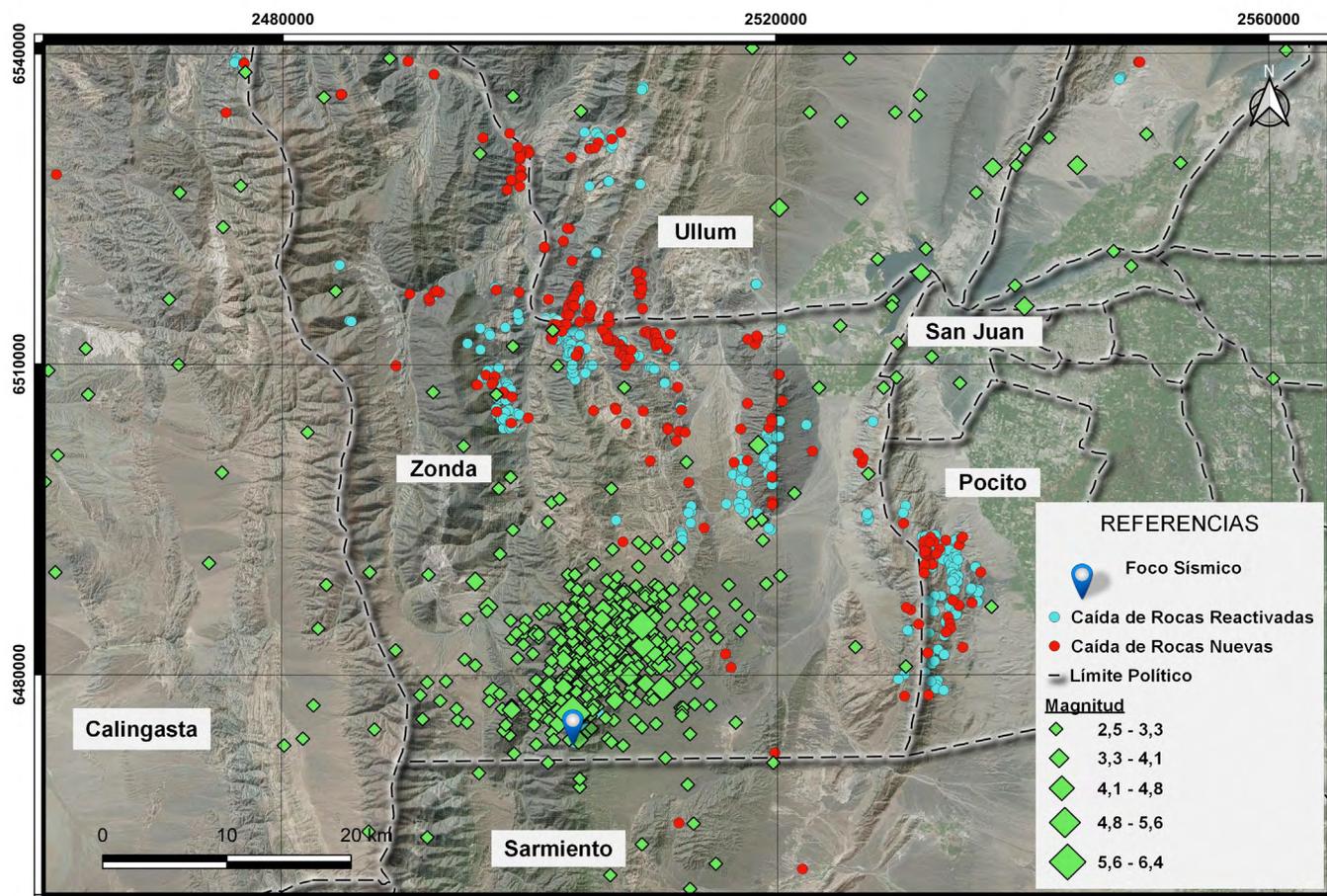


Figura 2. Ubicación del foco sísmico y sus réplicas en términos de intensidad desde el 18 al 20 de enero de 2021 (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Las caídas de rocas reactivadas se indican en azul, y las caídas de rocas nuevas, en rojo.

tre las coordenadas 2548156.726 y 2566981.958 metros de latitud Sur, y 6470854.118 y 6456413.447 metros de longitud Oeste, incluyendo los departamentos de Ullum, Zonda, Calingasta, Pocito y Sarmiento (Fig. 1).

En lo que respecta al clima, Poblete y Minetti (1989), utilizan la clasificación climática de Köppen (1948), basada en temperaturas medias y precipitaciones mensuales, para clasificar a la provincia como de régimen seco de desierto (BW). En la zona de trabajo se distingue el régimen climático seco desértico frío (Bwwka), donde la temperatura del mes más cálido es mayor con 22 ° y se ubica entre los 600 a 1800 m s.n.m. incluyendo el Valle del Tulum y la Precordillera Oriental.

Las precipitaciones tienen una marcada estacionalidad, el 85 % ocurren en el verano y el valor anual no supera los 90 milímetros (Pereyra 1993). El régimen hídrico del valle es netamente deficitario pues la evaporación excede ampliamente a las precipitaciones pluviales. En promedio las precipitaciones representan el 5 % del volumen evaporado en un año. Los vientos predominantes son del Sur y del Oeste.

Características del sismo

El movimiento telúrico y sus múltiples réplicas (Figs. 2 y 3) produjeron y reactivaron una gran cantidad de procesos de remoción en masa. Se han reconocido, en todos los casos analizados, caída de rocas. Esto se ha podido evidenciar en zonas aledañas y se ha extendido hasta 110 kilómetros al

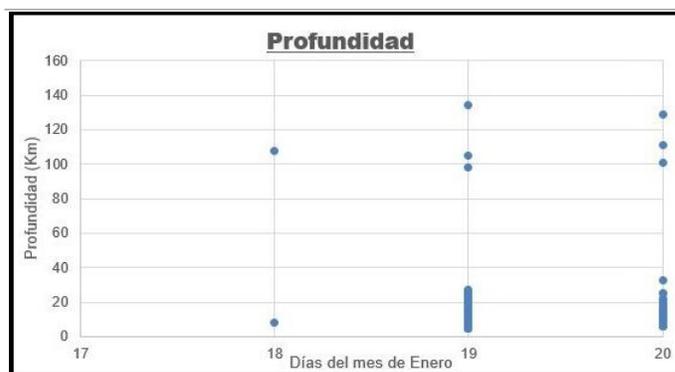


Figura 3. Datos registrados de sismos en términos de profundidad desde la superficie entre los días 18 al 20 de enero de 2021 (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Nótese que el promedio es de 15.25 km de profundidad.

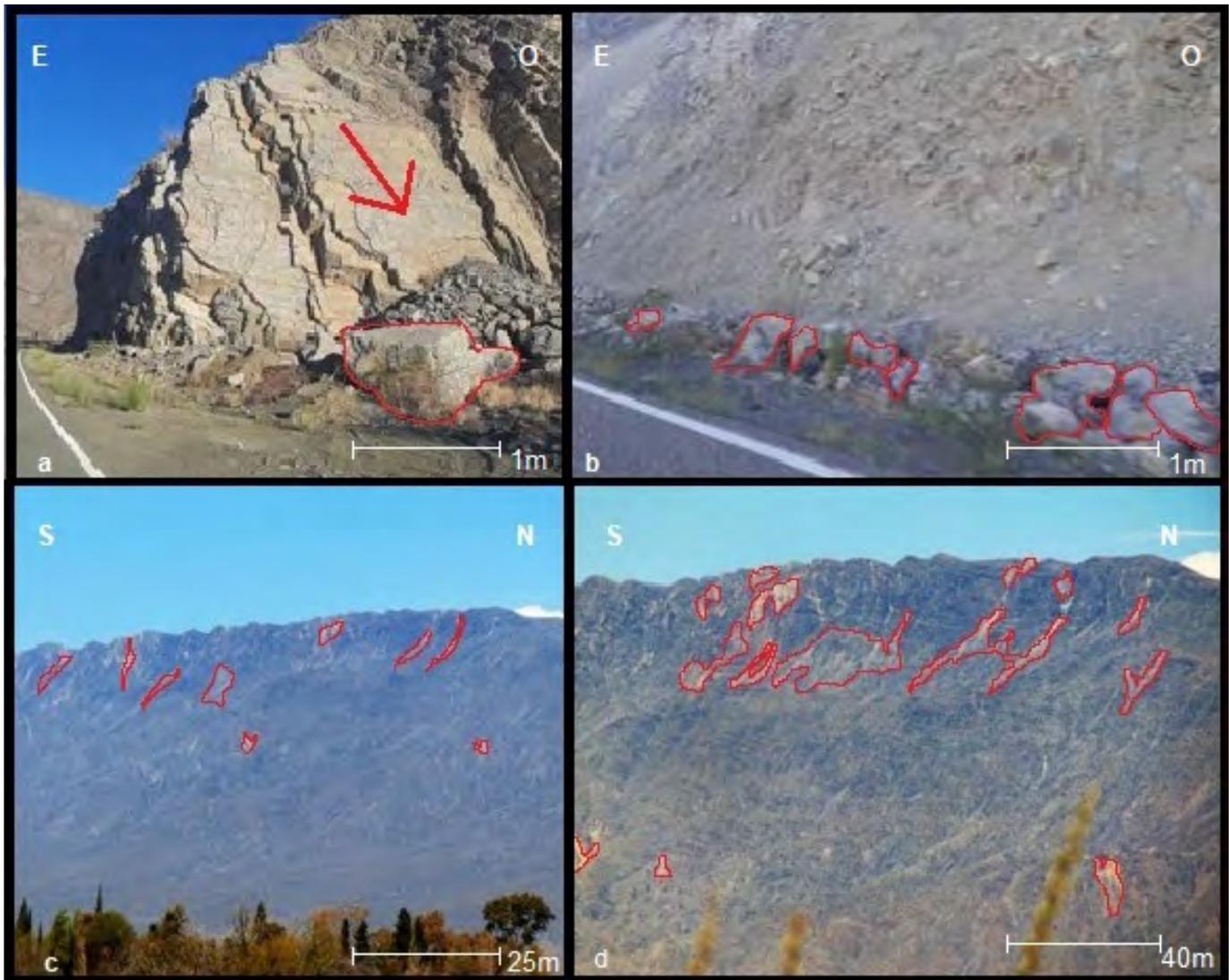


Figura 4. a-b) Caídas de rocas relevadas en la Ruta Provincial N° 436, Talacasto, donde se puede observar la inclinación de 65 ° hacia el sur, aproximadamente, que es favorable para la ocurrencia de las mismas. En color rojo, se encuentran delimitados los bloques caídos; c-d) Fotografías del extremo occidental de las Sierras Azules en el departamento Zonda dónde se pueden observar también caídas de rocas delimitadas en rojo.

Noreste aproximadamente del epicentro. Se ha observado la ocurrencia de estos procesos en varios sectores de los departamentos de Ullum, Pocito, Zonda, Sarmiento y Calingasta. Cabe destacar, que el sismo en cuestión, fue el de mayor magnitud registrado instrumentalmente en la provincia en los últimos 44 años, siendo su precedente el sismo en Caucete de magnitud 7.4 Mw en el año 1977.

El sismo destruyó al menos unas 3000 viviendas y generó importantes daños estructurales en las mismas (Diario La Nación 2021), caídas de roca (Figs. 4 y 5) que dieron como resultado, entre otras cosas, la obstrucción temporal y rompimiento de rutas nacionales y provinciales, entre ellas las RN 40, RP 12 y RP 436. En términos generales, no se reportaron personas fallecidas y los pocos heridos reportados en la provincia, fueron sólo por golpes de materiales caídos en sus viviendas.

MARCO GEOLÓGICO

Entre los 28 ° y 33 ° latitud Sur, la placa de Nazca subduce subhorizontalmente (con un ángulo entre 5 ° y 10 °) por debajo de la placa de Sudamérica (Anderson et al. 2007). Esta configuración se relaciona al hundimiento de la dorsal de Juan Fernández por debajo del margen sudamericano (Pilger 1981), lo que provoca un engrosamiento de la placa y la migración del frente de deformación hacia el antepaís (Gutscher et al. 2000, Ramos et al. 2002). La ausencia de vulcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca, la actividad tectónica cuaternaria (Ramos et al. 1997, Costa et al. 2000) y el levantamiento del antepaís de las Sierras Pampeanas (Jordan et al. 1983) son también consecuencias de la geometría de *flat slab* en estas latitudes. La convergencia dio origen al estilo de

deformación de faja plegada y corrida de Precordillera, que se divide en tres dominios estructurales llamados Occidental, Central y Oriental (Jordan et al. 1983, Ramos 1988, Mpodozis y Ramos 1989) (Fig.6) Mapa de foco sísmico, caída de rocas y provincias geológicas.

La Precordillera Central es una faja plegada y corrida de piel fina (Rolleri 1969, Ramos 1988, Ramos 1999). Está formada por cordones montañosos de orientación meridional constituidos por rocas del Ordovícico (calizas y margas), Silúrico – Devónico (areniscas y lutitas), Carbonífero (areniscas y lutitas fluviales) y depósitos neógenos (conglomerados, areniscas y arcilitas), con intrusión de algunos cuerpos subvolcánicos ácidos (Fig.7. Mapa Geológico). Los cordones son elevados por corrimientos de bajo ángulo, inclinados al Oeste y por pliegues de vergencia oriental. Existen al menos hasta seis corrimientos principales con nivel de despegue en las secuencias cambro- ordovícicas (Allmendinger et al. 1990). El Cuaternario está representado principalmente por depósitos aluviales y coluviales (Ramos y Vujovich 2000). Por otra parte, la Precordillera Oriental es una faja plegada y corrida de piel gruesa (Rolleri 1969, Ortíz y Zambrano 1981, Ramos 1988, Allmendinger et al. 1990), posee fallas de alto ángulo y vergencia occidental (Zapata y Allmendinger 1996). Las fallas alcanzan profundidades de hasta 30 kilómetros (Cominguez y Ramos 1991, Zapata y Allmendinger 1996) involucrando basamento, pero sin exponerlo. Rocas calcáreas y siliciclásticas marinas cambro - ordovícicas y en menor extensión del Silúrico, Devónico y Carbonífero forman los cordones de la Precordillera Oriental. El Neógeno está representado por secuencias sinorogénicas de antepaís que bordean los depósitos más antiguos.

Zapata y Allmendinger (1996) establecieron que en la región de interacción entre los empujes con vergencias opuestas entre Precordillera Central y Oriental (Fig. 6) se desarrolló, a partir de los 2.7 ma, una zona triangular de piel gruesa. Tal sector coincide con los valles Matagusanos, Maradona y Acequión que dieron nombre al corredor tectónico homónimo (Perucca et al. 2013, Audemard et al. 2016) donde se reconocieron fallas cuaternarias.

Marco neotectónico

La zona del epicentro del sismo del 18 de enero de 2021 y de sus réplicas se localiza en el área de Pampa de Bachongo y valle de Maradona (Fig. 1). Estos valles forman parte del corredor tectónico denominado por Perucca (1990) como corredor tectónico Matagusanos - Maradona - Acequión. Se trata de una depresión elongada de rumbo Norte - Sur que separa las unidades morfoestructurales de Precordillera Central y Precordillera Oriental, ambas de estilos estructurales dife-

rentes, uno con fallas inversas de vergencia oriental y el otro con fallas inversas de vergencia occidental, respectivamente (Perucca 1990, Siame et al. 2006).

Las sierras de Villicum, Marquesado y Chica de Zonda (Precordillera Oriental) limitan el corredor tectónico por el Este, mientras que las Sierra de La Dehesa, Cerro Zonda, Sierra Alta de Zonda, Cordón de Las Osamentas y Cerros Bajos (Precordillera Central) lo bordean por el Oeste (Perucca 1990, Perucca y Onorato 2011, Perucca et al. 2013). Alur del río San Juan, en el piedemonte occidental de la Sierra Chica de Zonda (Precordillera Oriental) se ubican trazas paralelas de la falla Villicum-Zonda, que se derivan de la traza principal de esta estructura, como fallas tipo cola de caballo y muestran evidencias de actividad al menos hasta el Neógeno superior. Esta estructura es un sistema de fallas inversas de escala regional (Bastías 1986) que se extiende por 145 kilómetros en distintos segmentos con orientación NNE. Son fallas de alto ángulo y colocan calizas cámbricas sobre sedimentitas neógenas y cuaternarias. Además, existen niveles aluviales cuaternarios “colgantes”, discordancias progresivas y pendientes anómalas (Perucca et al. 2012), que indican actividad reciente.

En el frente de Precordillera Central (hacia el sur del río San Juan), Perucca y Onorato (2011) describieron la falla de Las Osamentas. Esta falla tiene un rumbo Norte - Sur y buzamiento entre 30 ° y 45° Oeste, coloca rocas carboníferas sobre sedimentos del Pleistoceno. En el piedemonte oriental del Cordón del Espinacito y Cordón de Las Osamentas, Bastías (1986) identificó la falla inversa Maradona a la que posteriormente, Lara Ferrero (2015) nombró como sistema de falla Maradona, por tratarse de un conjunto de estructuras paralelas de 30 km de longitud y rumbo Noroeste. Este sistema coloca rocas neógenas sobre depósitos aluviales cuaternarios con un buzamiento promedio de 45 ° Oeste y vergencia oriental. Algunas de las evidencias de la actividad de estas fallas son escarpes y manantiales alineados con abundante vegetación. Las cubiertas aluviales muestran pendientes y terrazas anómalas (Perucca 1990, Moreiras y Banchig 2008, Perucca et al. 2012, Lara Ferrero 2015, Lara Ferrero et al. 2017, 2018). Se presume que esta falla continúa hacia el sur como una estructura ciega (Perucca y Vargas 2014, Lara Ferrero 2015; Lara Ferrero et al. 2017, 2018).

Hacia el este de dicho sistema, aparece la falla del Cerro Tres Mogotes (Fig.7 Mapa Geológico) la cual constituye un retrocorrimiento con inclinación al oeste, asociado con estructuras pre-cuaternarias (Baldis y Chebli 1969). En el piedemonte oriental del Cerro Tres Mogotes, Perucca et al. (2012) reconocieron fallas inversas con vergencia oriental y orientación Norte – Sur las que constituyen un ramal de la

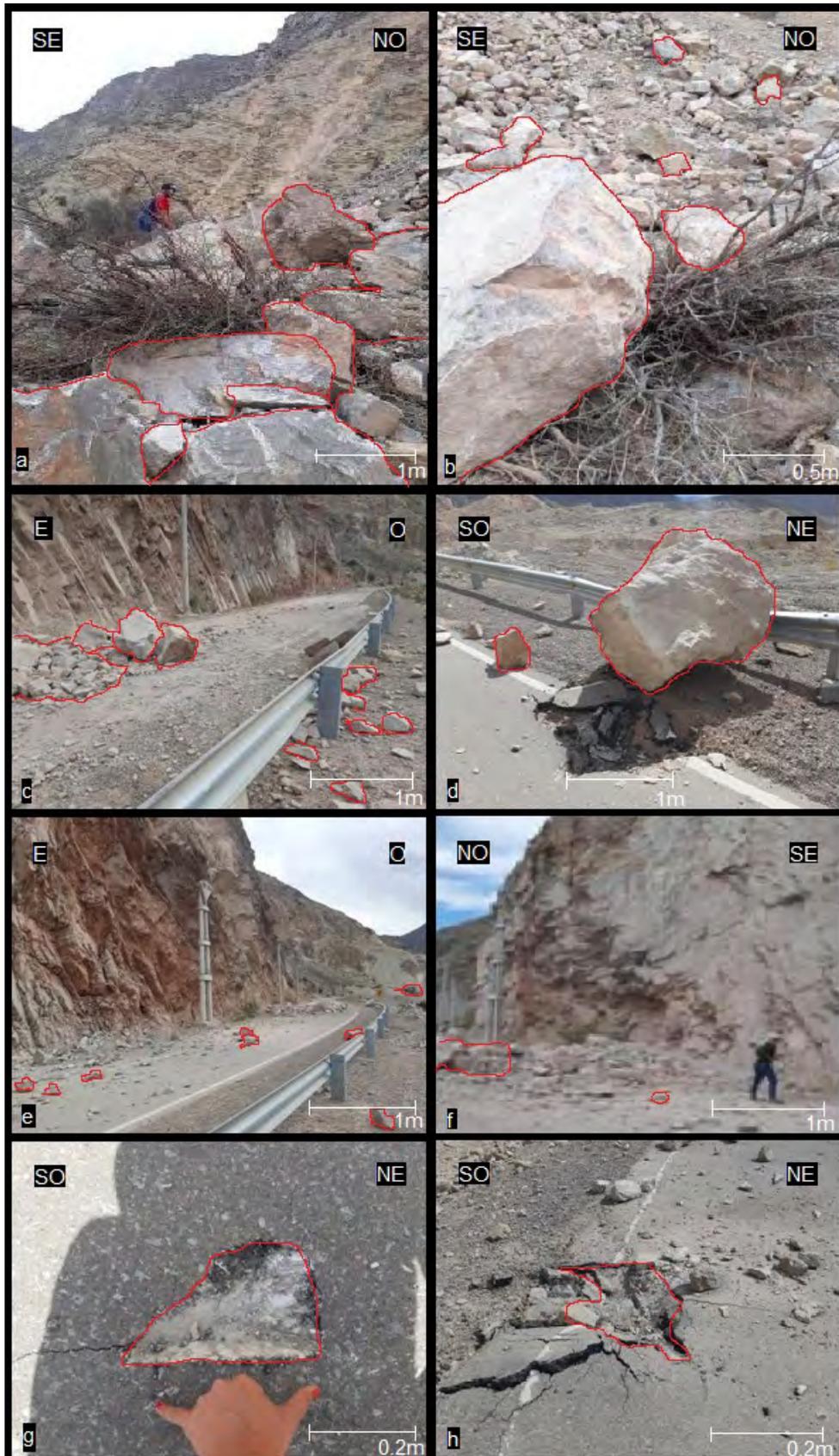


Figura 5. Imágenes obtenidas en el campo, donde se muestran caídas de rocas cuyo tamaño superan el metro cúbico: a-b) Caídas de rocas en el departamento Pocito, sector oriental de la Sierra Chica de Zonda; c-f) Inmediaciones del Dique Punta Negra, sobre Ruta Provincial N° 12; g-h) Marcas de impacto y rebote delimitados en rojo, de algunos bloques caídos.

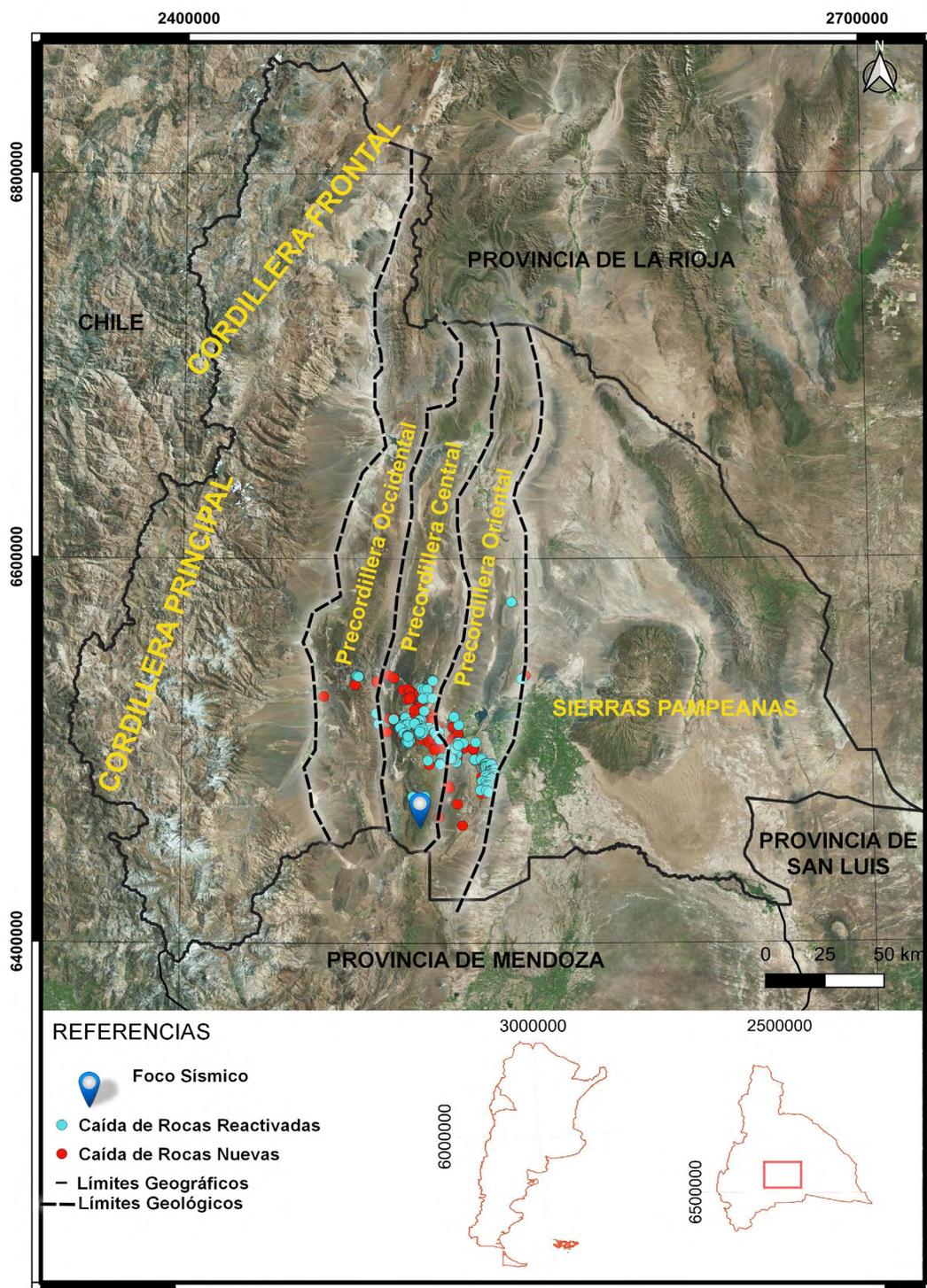


Figura 6. Imagen satelital *Digital Globe-WorldView-4* de 30 cm de resolución de fondo con la ubicación de las caídas de roca nuevas (en color rojo) y reactivadas (en color azul), en el marco de las provincias geológicas de San Juan.

falla Papagayos (Perucca et al. 2012). Estas fallas tienen un rumbo casi Norte - Sur e inclinan con bajo ángulo hacia el oeste, afectando depósitos aluviales del Pleistoceno. Estos autores dataron un nivel de carbonato ubicado en depósitos de grano fino afectados por estas fallas, dando una edad de 22.420 ± 390 años BP, por lo que consideraron que la última reactivación ocurrió antes de esta edad.

De acuerdo a la zonificación sísmica realizada por el Insti-

tuto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), el sector sur de San Juan y norte de Mendoza representan las áreas de Argentina catalogadas como las de muy elevada peligrosidad sísmica. Esto debido a una elevada actividad sísmica generada por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Los sísmos en esta región de *flat slab* son de intraplaca, de magnitudes variables y algunos llegando a ser sísmos destructivos asociados a de-

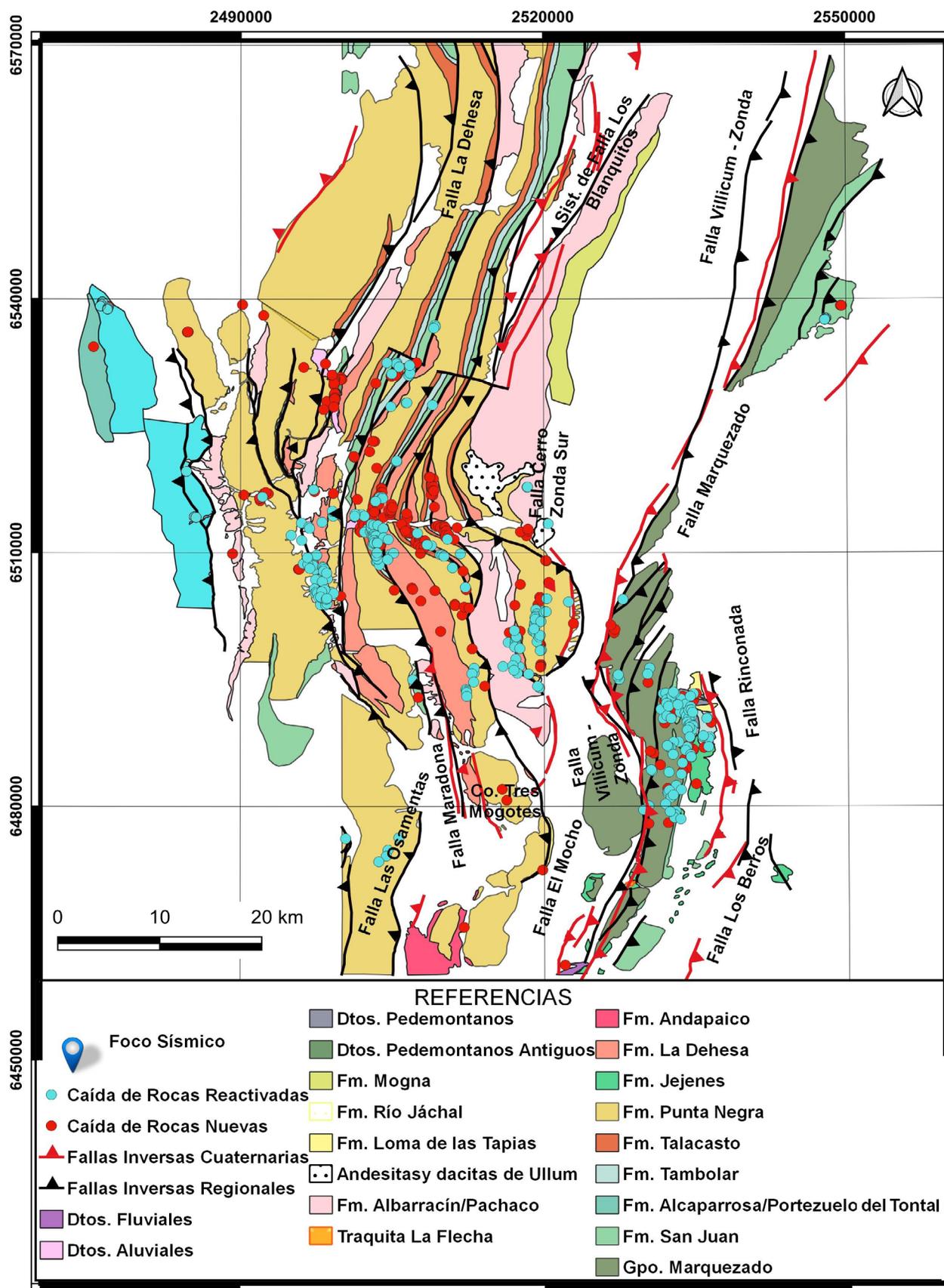


Figura 7. Mapa geológico del área de estudio con la distribución de caídas.

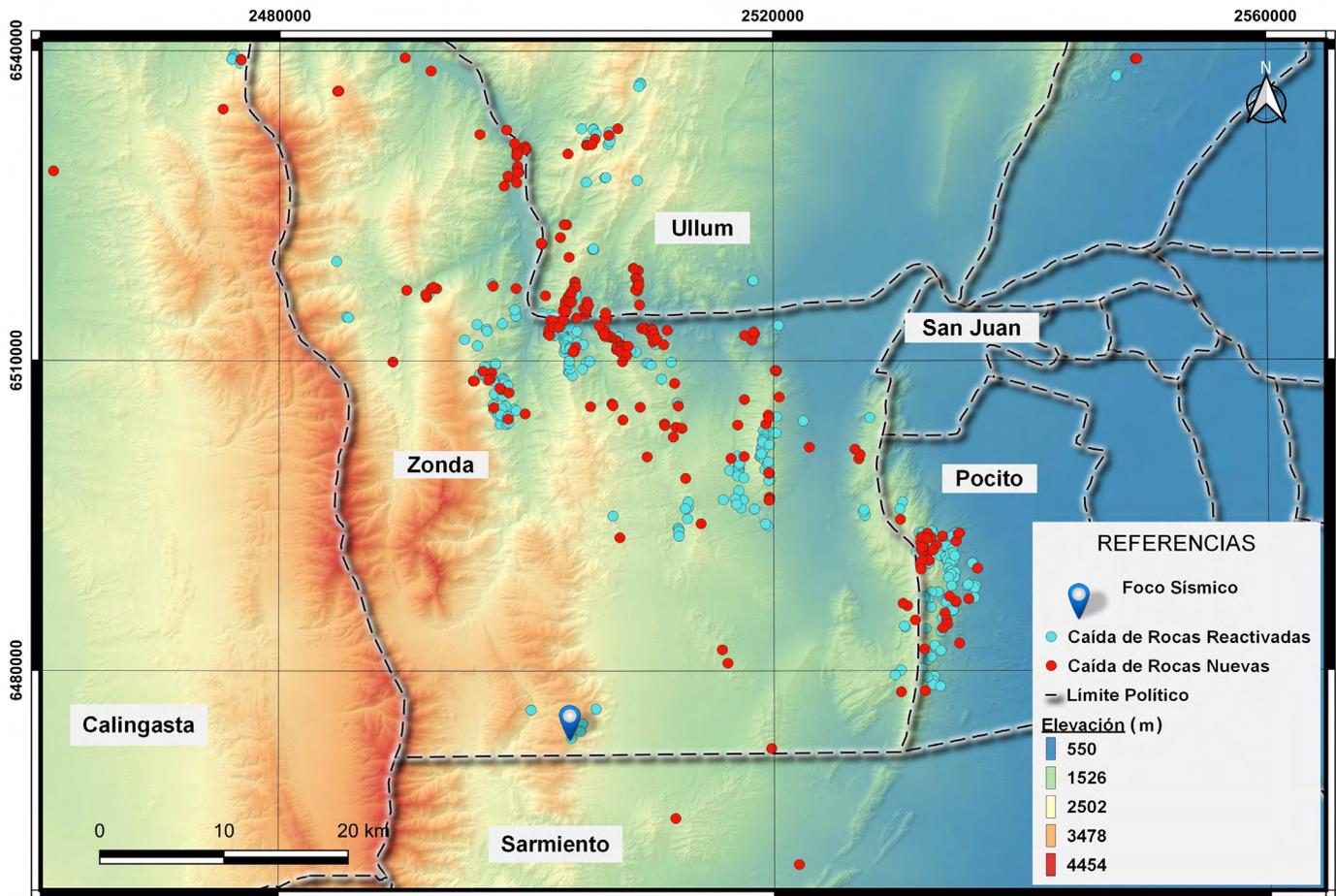


Figura 8. Mapa de elevaciones expresadas en metros donde se indican las caídas de rocas nuevas (círculos rojos) y reactivadas (círculos azules).

formaciones del terreno (Perucca y Paredes 2003, Alvarado y Beck 2006).

Aunque no existen registros de ocurrencia de sismos de $M_w \geq 7$ en épocas históricas en la región de análisis, Lara Ferrero (2015, 2018) estima para el sistema de falla Maradona un potencial para generar sismos de $M_w > 6$ y consideró a estas estructuras como una potencial fuente de peligro sísmico, capaz de afectar a centros poblados de la provincia de San Juan.

METODOLOGÍA

Para la realización del mapa inventario de caídas de rocas, se llevó a cabo una comparación de Imágenes *Landsat* adquiridas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*), obtenidas el día 19 de Enero de 2020 (pre sismo) y el día 21 de Enero de 2021 (post-sismo). El criterio de elección de estas imágenes, además de la disponibilidad de las mismas sin nubosidad, fue que estuviesen en la misma época estival para que se visua-

licen las mismas condiciones climáticas y así evitar errores perceptivos de la imagen.

Se realizó la identificación de caídas de rocas en terreno, y un exhaustivo trabajo con modelos digital de elevación e imágenes satelitales *Digital Globe-WorldView-4* de 30 cm de resolución en plataforma del tipo sistema de información geográfico para obtener, comprender y evaluar preliminarmente los factores condicionantes que les dieron origen.

Se calcularon los índices de elevación, pendiente y orientación, obtenidos de un modelo digital de elevación de alta resolución (12.5 metros) con plataforma ALOS y sensor PALSAR (NASA 2008), del que se extrajeron los datos correspondientes de cada caída de rocas, en términos de índices geomorfológicos y litología. La evaluación y análisis de los datos se complementa con imágenes satelitales (*Digital Globe-WorldView-4* de 30 cm de resolución) y observaciones en terreno.

Se realizó un mapa geológico tomando como base las hojas geológicas del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) 3169-IV San Juan (Ramos y Vujovich 2000), a escala 1:250000 y las hojas 3169 - 34 Los Berros (Cardó et

al. 2020) y 3169-27 Barreal a escala 1:100000 (Anselmi et al. 2021). Esto se realizó teniendo en cuenta las formaciones y/o grupos donde se produjeron las caídas de rocas. Esto sirvió además, para comprender mejor el mapa inventario y poder analizar otros posibles factores condicionantes de las caídas de rocas.

La comparación o relación de las variables con la ocurrencia de caídas de rocas nuevas y reactivadas se realizó mediante frecuencias relativas absolutas, mostrando las mismas a partir de histogramas normalizados de frecuencias.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se detectaron 507 procesos de caídas de rocas, de los cuales 235 son procesos nuevos, y 272 reactivados, distribuidos principalmente en los sectores más elevados de cerros y sierras. Los depósitos de caídas de roca presentan un tamaño promedio de 10 m (1000 m³) (Figs. 4 y 5). En un radio promedio de 60 km a partir del foco del movimiento sísmico. En su gran mayoría, se desarrollan en pendientes mayores a 30°, en laderas orientadas al Este. La precisión de los mapas

elaborados a partir de este análisis, estuvo limitada por la resolución de las imágenes empleadas.

Cabe destacar, que si bien el foco del sismo se generó en el área de la falla Maradona (pampa de Bachongo), las caídas de rocas observadas en este trabajo se distribuyen casi en su totalidad a lo largo de las laderas orientales de las sierras y cordones que componen la faja plegada y corrida de Precordillera Central. En menor medida, se distribuyen en las laderas orientales de las sierras de Precordillera Oriental, como es el caso de la Sierra Chica de Zonda.

De las caídas de rocas analizadas (507), estas se muestran mayoritariamente en elevaciones (Fig. 8) entre los 1187 y 2099 m s.n.m., concentrándose el 71.5 % del total de las caídas nuevas y el 73.2 % de las reactivadas, entre dichas elevaciones (Fig. 8). Respecto a la pendiente, el 51.5 % de las caídas de rocas nuevas y el 48.2 % de las reactivadas se concentran en pendientes de 30° a 45° (Fig. 9).

Las caídas de rocas se identifican en las laderas orientadas hacia el este en un 48.9 y 62.1 % para las nuevas y reactivadas, respectivamente, y hacia el sur en un 31.1 y un 33.5 % para las nuevas y reactivadas, respectivamente (Fig. 10). Esto coincide con la morfología de las sierras de Precordillera

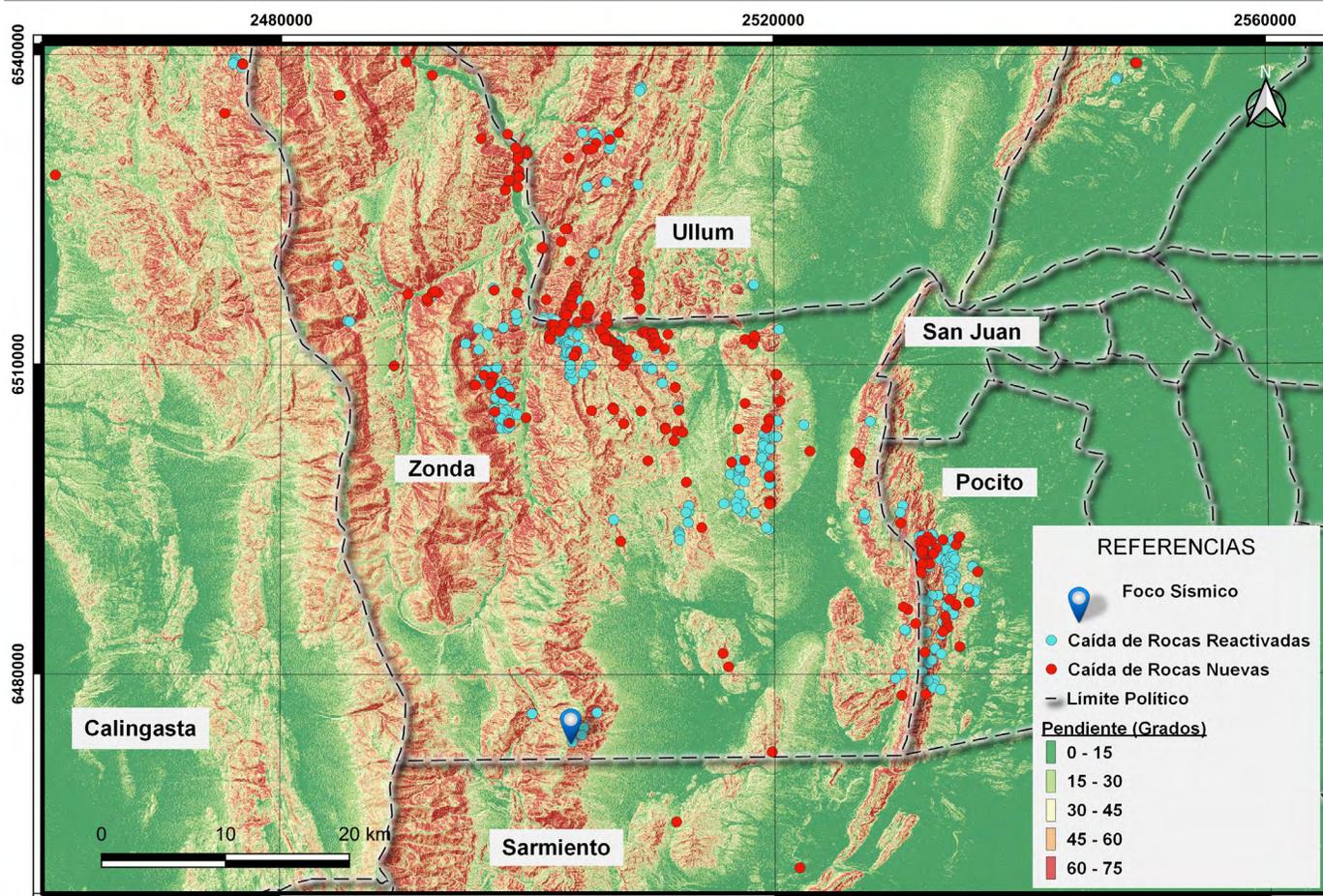


Figura 9. Mapa de pendientes expresadas en grados donde se indican las caídas de rocas nuevas (círculos rojos) y reactivadas (círculos azules).

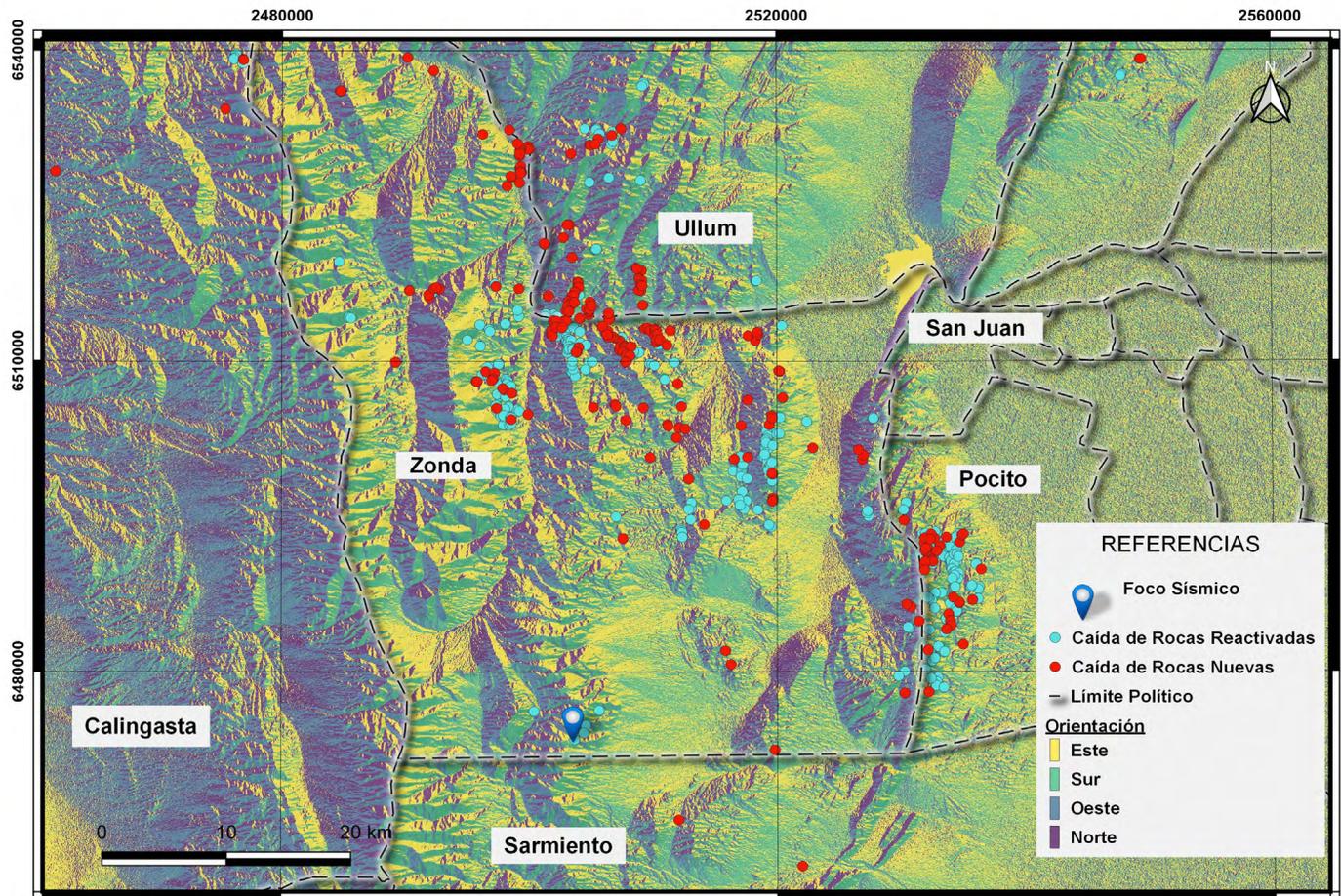


Figura 10. Mapa de orientación de laderas expresada en términos de puntos cardinales mostrando las caídas de rocas nuevas (círculos rojos) y reactivadas (círculos azules).

Central, en las que se distinguen las mayores pendientes en las laderas orientales favoreciendo el movimiento de material por caída y deslizamiento. Por el contrario, las laderas occidentales son más suaves y extensas. Esto se explica a partir de las fallas regionales de vergencia oriental que afectan los flancos de los cordones montañosos y elevan las diferentes láminas de esta faja plegada y corrida (Figs. 11 y 12) dejándolas como *hanging wall* (paredes colgantes) susceptibles al desmoronamiento (Junquera-Torrado et al. 2019). La compresión andina levantó las láminas de corrimiento y con el ascenso de las sierras, comenzó a actuar la erosión fluvial, que labró profundos valles entre estos cordones montañosos jóvenes. Como respuesta se produjo una relajación o extensión de las laderas (deformaciones de ladera), por la liberación del esfuerzo residual vinculado a la presión tectónica (Fauqué et al. 2006). Las deformaciones de ladera fueron precursoras de las avalanchas de rocas. Éstas habrían sido disparadas por sacudidas sísmicas o precipitaciones, ya que las estructuras tensionales producidas por la deformación de laderas (fallas normales) favorecieron la infiltración de agua, una parte de los materiales removidos cubre actualmente las escarpas de

falla orientales de la Sierra de Tontal y del cordón del Alto de Arena (Fauqué et al. 2006). Las pendientes máximas y promedio en tres sectores donde se observó la mayor localización de los procesos de remoción en masa dan los siguientes valores que se pueden observar en el cuadro 1. Se agregan también los valores de máxima pendiente y el promedio de las mismas en el cordón de las Osamentas por ser el frente montañoso contiguo al epicentro del sismo.

Las caídas reconocidas en la ladera oriental de la Sierra Chica de Zonda podrían presentarse como una anomalía al patrón de distribución, ya que las mayores pendientes en promedio de dicha sierra, se localizan hacia el Oeste respetando la morfología generada por la vergencia de las estructuras pertenecientes a Precordillera Oriental. Si bien, la pendiente general de la ladera Este de esta sierra es más extensa y de menor gradiente que la occidental, está afectada por fallas que generan pendientes anómalas en este sector, generando en sectores puntuales pendientes de hasta 32° . Además, el piedemonte oriental de dicha sierra es afectado por fallas con comprobada actividad cuaternaria (Bastías et al. 1984, Martos 1987, Martos 1993, Costa et al. 1999). Las distancias

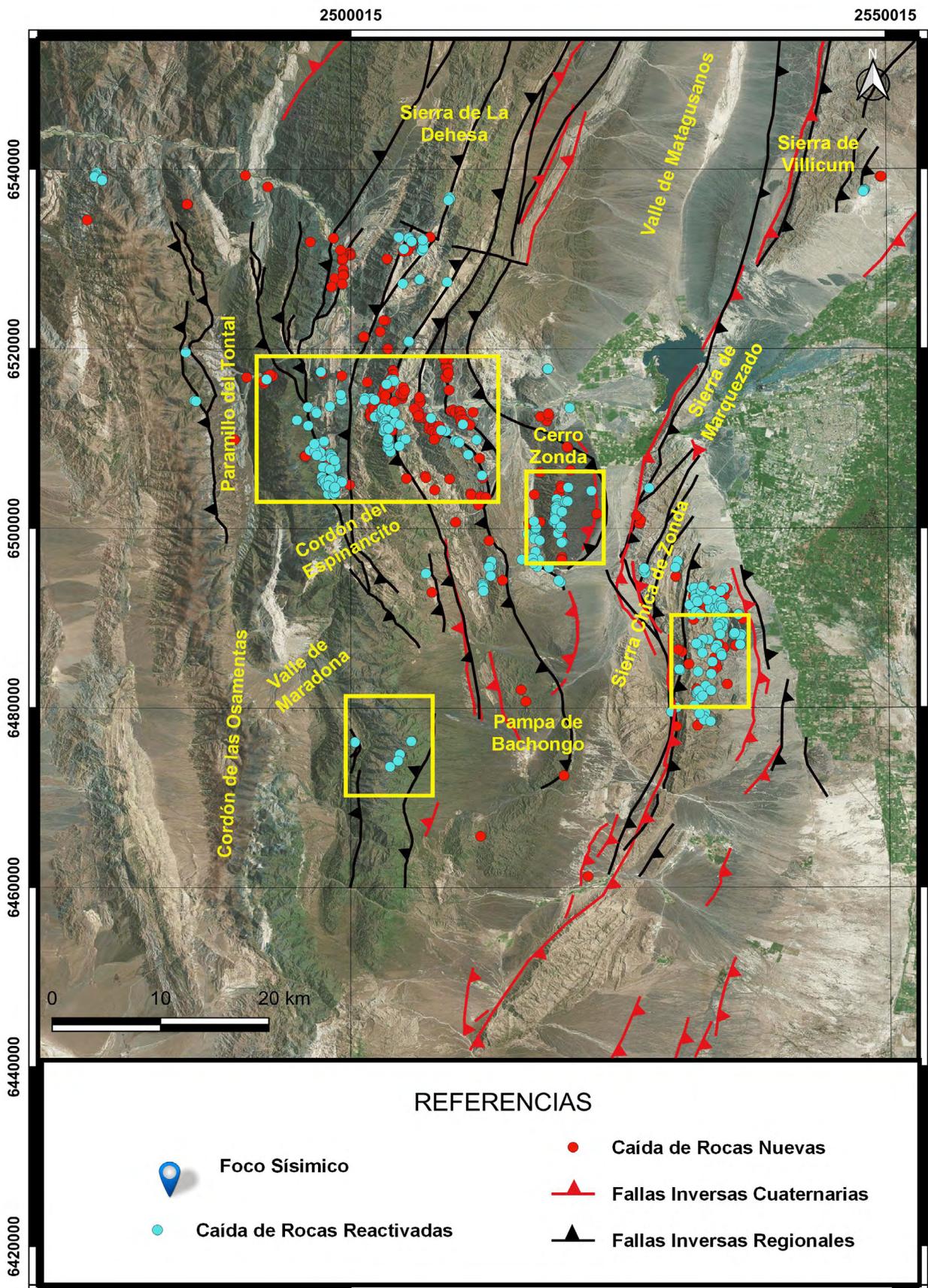


Figura 11. Imagen satelital con la ubicación de las caídas de roca nuevas y reactivadas. Con recuadros amarillos se indican las zonas donde se realizaron los perfiles topográficos (Fig. 12).

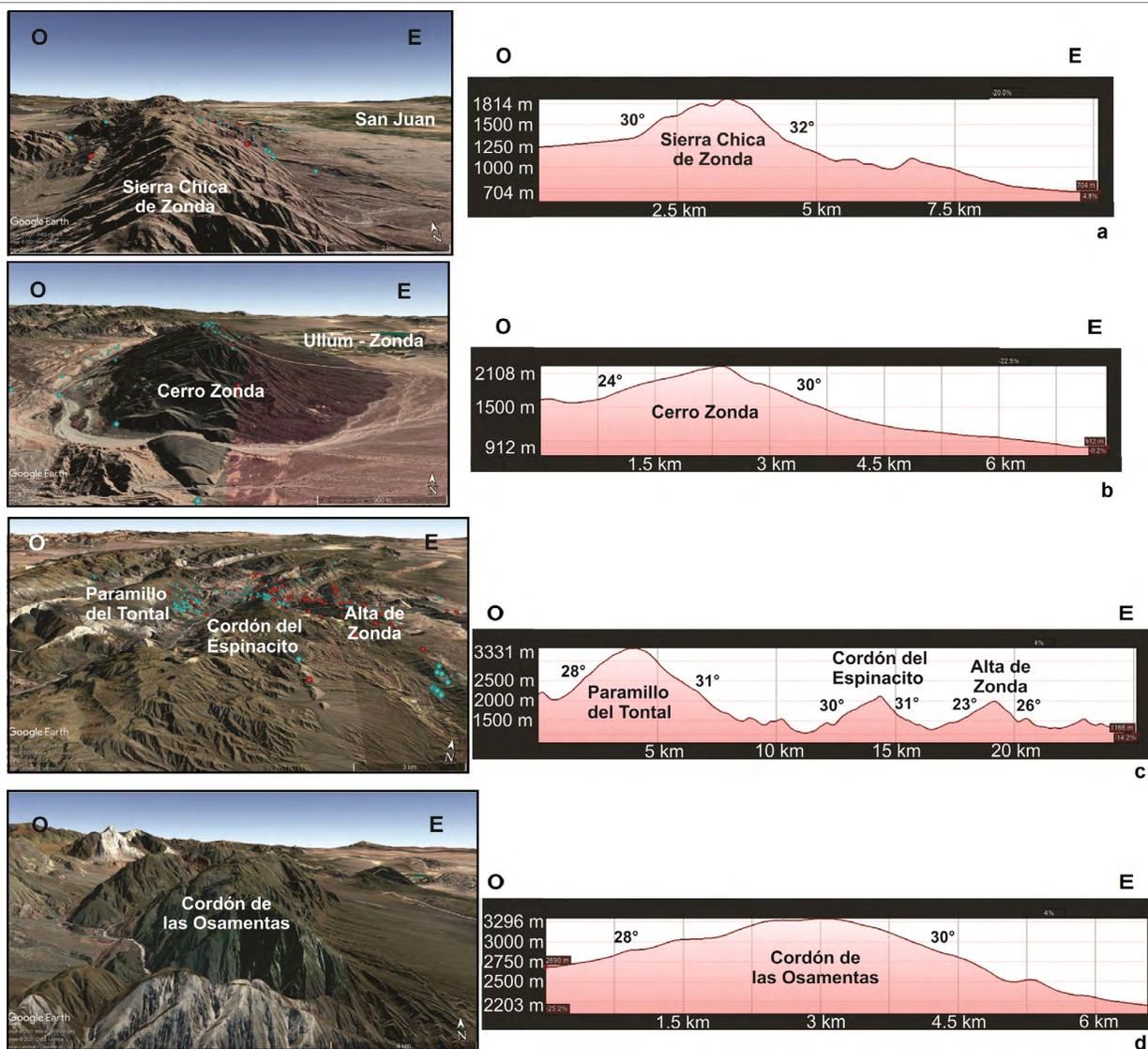


Figura 12. Cuatro perfiles topográficos realizados con datos de elevación satelital de la *Shuttle Radar Topography Mission (1 Arc-Second Global)* en sectores donde hay mayor concentración de caída de rocas (Sierra Chica de Zonda, Cerro Zonda, Cordones Paramillo del Tontal y del Espinacito, y Sierra Alta de Zonda y Cordón de las Osamentas) con los valores máximos de pendientes de sus laderas occidentales y orientales.

aproximadas entre los lugares de desprendimientos y la falla La Rinconada varía entre 0.6 y 5.2 km aproximadamente. La distribución de las caídas de roca en la Sierra Chica de Zonda pudo haber sido también controlada por esta estructura (reactivación de antiguos deslizamientos asociados).

Con respecto a las condiciones climáticas, en el presente estudio no se cuenta con registros de precipitaciones de estaciones meteorológicas, sin embargo, en el mes de Diciembre y días anteriores al evento sísmico se registraron lluvias previas. Estos datos han sido obtenidos mediante recopilación de diarios locales. Según los diarios locales (Diario de Cuyo, Diario el Zonda y Diario digital San Juan al día), se han registrado lluvias los días 2 de Diciembre (intensa lluvia con granizo en varios departamentos, los más afectados fueron 25 de Mayo, Sarmiento, Angaco y Pocito), 17 y 26 de diciembre 2020 (el fenómeno fue reportado primero en la zona Norte y

Cuadro 1. Valores promedio y de máximas pendientes de las laderas occidentales y orientales sobre las transectas realizadas en las elevaciones donde se reconocieron las mayores concentraciones de caída de rocas.

	Pendiente promedio (ladera occidental)	Pendientes máx. (ladera occidental)	Pendiente promedio (ladera oriental)	Pendientes máx. (ladera oriental)
Sierra Chica de Zonda	18°	30°	17°	32°
Cerro Zonda	14°	24°	20°	30°
Paramillo del Tontal	17°	28°	19°	31°
Cordón del Espinacito	17°	30°	17°	31°
Sierra Alta de Zonda	14°	23°	18°	26°
Cordón de las Osamentas	12°	28°	18°	30°

Histograma de frecuencias normalizadas de Caída de Rocas

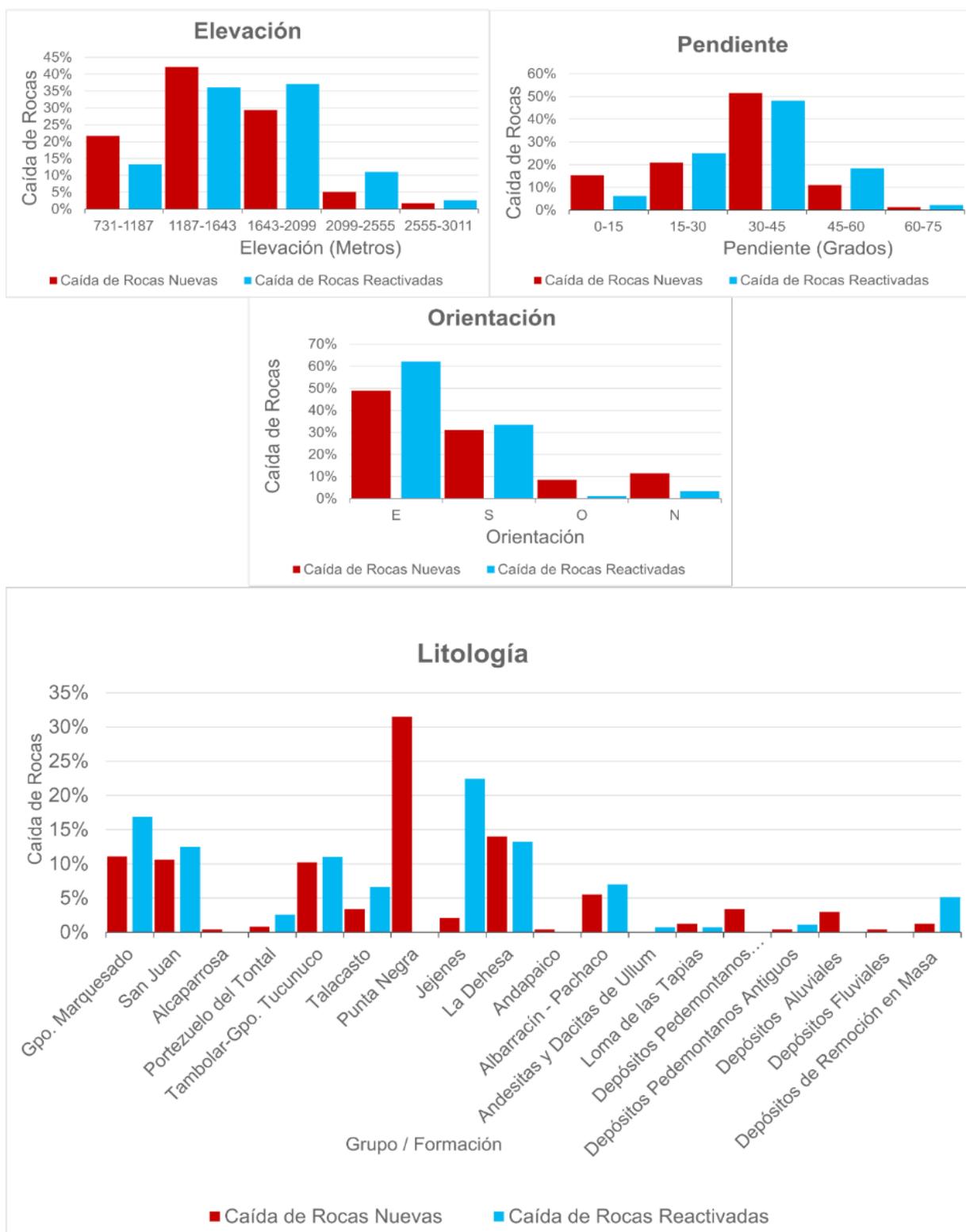


Figura 13. Histogramas de frecuencias normalizadas de caídas de rocas nuevas y reactivadas (en porcentaje) vs. índices de variables calculadas.

Oeste de la provincia y luego fue expandido al resto de la provincia, siendo el departamento de Ullum el más afectado con fuertes crecientes, que también fueron registradas en la

zona de Sarmiento).

Las tormentas registradas en el mes de Enero de 2021 fueron los días 5 y 15 de Enero, (Diario de Cuyo). Para la pri-

mera tormenta, fue registrada una medición anómala de unos 14.5 milímetros de lluvia en la ciudad de San Juan, cantidad poco habitual para la época en la provincia (Diario de Cuyo). El 15 se registró una fuerte tormenta eléctrica en la provincia que generó lluvias en distintas zonas, uno de los sectores más afectados fue Jáchal (tormenta torrencial con generación de crecidas), y en los departamentos de Albardón, Angaco y Pocito donde inclusive hubo evacuados.

Las unidades litológicas afectadas por las caídas de rocas corresponden a: a) Grupo Marquesado cámbrico (calizas, calizas arcillosas, margas, dolomías y fangolitas calcáreas), b) Depósitos sedimentarios ordovícicos de la Formación San Juan, Formación Alcaparrosa y la Formación Portezuelo del Tontal, c) Depósitos de edad silúrica representados por sedimentitas del Grupo Tucunuco, d) Series clásticas devónicas de las Formaciones Talacasto y Punta Negra, e) Depósitos carboníferos y pérmicos en facies continentales y marinas de transición correspondientes a las formaciones Jejenes, La Dehesa y Andapaico, f) Formación Loma de Las Tapias y cuerpos subvolcánicos andesíticos a dacíticos con xenolitos de basamento ígneo y metamórfico conocidos como Andesitas y Dacitas de Ullum, y g) Depósitos cuaternarios de edad pleistocena - holocena (Fig. 7). La Formación Punta Negra es la que concentra el 30.1 % de las caídas de rocas nuevas y el 20.6 % de reactivadas; y en menor medida, alrededor del 10 % de caídas de rocas tanto nuevas como reactivadas, se encuentran en el Grupo Marquesado y en las formaciones La Dehesa, Tambolar, Grupo Tucunuco y Formación San Juan, respectivamente. Todas ellas, intensamente meteorizadas y con formación escasa de suelo.

En la zona de la Sierra Chica de Zonda los estratos rocosos pertenecientes al Grupo Marquesado, Formación San Juan y Formación Rinconada del Grupo Tucunuco, presentan mayoritariamente orientaciones Noreste-Suroeste e inclinaciones hacia el Noroeste.

Las rocas devónicas - carboníferas de las Formaciones Punta Negra y la Dehesa en el Cerro Zonda, presentan orientaciones Noreste-Suroeste con inclinaciones promedios de 30 ° al Sureste, y las rocas neógenas de la Formación Albarracín - Pachaco en el sector Sur presentan orientaciones Norte - Sur inclinando 20 ° hacia el Este.

Sobre la ruta 12 en inmediaciones del dique Punta Negra, la Formación homónima presenta una dirección Noreste - Suroeste con inclinación de 63 ° al Noroeste, mientras que la Formación Albarracín inclina 80° al Noreste, con una orientación Noreste - Suroeste. Hacia el Oeste, esta última presenta una orientación Noroeste - Sureste con una inclinación de 34 ° a 38 ° hacia el Sur - Suroeste.

Acosta et al. (2021) estudiaron tres deslizamientos reac-

tivados en la Precordillera Central mediante la técnica avanzada *SBAS-DInSAR* combinada con análisis geomorfológicos preliminares, y observaron que las rocas involucradas pertenecen a la Formación Punta Negra. Las condiciones locales como los materiales meteorizados, erosión fluvial, articulaciones o fisuras materiales, estratificación de capas competentes e incompetentes, inmersión en coincidencia con la pendiente de la ladera, vegetación nula o escasa cubierta, son factores desestabilizadores observados en las zonas de deslizamiento. Fauqué et al. (2006, 2008) citan una sucesión de procesos geodinámicos que comienzan con el desarrollo de deformaciones gravitacionales profundas (*sackung*) y expansiones de crestas (*gravitational spreading of ridges*) que afectan a la sierra del Tontal y producen inestabilidad en las laderas, culminando en grandes avalanchas de rocas ubicadas principalmente en las laderas orientales de la misma.

Las relaciones de los índices y variables calculadas con los respectivos porcentajes de frecuencia de caídas de rocas nuevas y reactivadas se muestran en la figura 13.

Las caídas generadas y reactivadas se ubican en la zona del foco sísmico, y otra gran mayoría en el límite político de Ullum - Zonda. Ambas zonas responden a las mismas características en términos de índices geomorfológicos y litología, además la distribución de las caídas debería ser relativamente uniforme a lo largo del sistema de fallas debido a que son zonas más propensas a generar estos tipos de fenómenos, y según lo analizado en el área de estudio, esto no es así. En este contexto, el sismo sería el desencadenante directo de las remociones en masa co-sísmicas a lo largo de la faja plegada y corrida de Precordillera Central. Si bien, se supone que la intensidad sísmica estimada en roca se atenúa con la distancia al epicentro (Mardones y Rojas 2012), Menéndez (1991) definió a partir de la experiencia del sismo de 1985 en la zona central de Chile, desde el punto de vista microsísmico, isosistas que permiten corregir las intensidades considerando las características locales de los suelos de fundación. Aunque no presenta resultados para roca meteorizada, sugiere que en depósitos coluviales (que podrían tener una textura semejante a dichas rocas), la intensidad sísmica se podría incrementar en 1 a 2 puntos de magnitud respecto de la intensidad estimada en roca y en depósitos arcillosos (i.e. márgenes de ríos y lagos), la cual se podría incrementar hasta 2.5 puntos, respecto de la intensidad estimada en roca. Es decir, las vibraciones sísmicas habrían sido notablemente superiores en la roca meteorizada. En el estudio del sismo de Maule del 27 de Febrero de 2010, de magnitud 8.8 Mv, Moya et al. (2015) proponen un control litológico (rocas blandas neógenas poco competentes como areniscas y limolitas) como factor de primer orden en la generación de remociones

en masa (deslizamientos de roca y de suelo, caídas de roca y avalanchas de roca).

El peso de los factores condicionantes en la ocurrencia de procesos co-sísmicos, fue revelado por los estudios de Denier et al. (1991) sobre el sismo de Limón (M: 7.5; profundidad: 16.5 km) ocurrido el 22 de abril de 1991 en la vertiente caribeña de Costa Rica, donde se observó una marcada excentricidad entre las áreas más severamente afectadas por procesos de remoción en masa y el epicentro del sismo cortical superficial. De acuerdo a lo que se plantea en este trabajo, las dos zonas con mayor cantidad de movimientos de ladera se podrían deber a: a) La cercanía al epicentro del sismo, y b) Factores condicionantes en la ocurrencia de procesos co-sísmicos, fundamentalmente geológicos y geomorfológicos. Por lo que, en este caso de estudio a aproximadamente unos 40 kilómetros al noreste del foco del sismo, esa activación se podría deber por algunas de las razones previamente descritas por estos autores. Esto es consistente con lo propuesto por Keefer (2002), y se puede estimar que para un sismo de esta magnitud (6.4 Mv), es predecible encontrar procesos de remoción en masa (caídas de rocas, deslizamientos de rocas y de suelo) a una distancia máxima de 100 km del epicentro.

Es importante aclarar que los procesos de remoción en masa, como son las caídas de rocas, no solo ocurren como causa de factores condicionantes de tipo natural sino también por factores de tipo antrópico. Algunas causas pueden ser: a) Ocupación inadecuada del territorio, b) Extracción de agregados (canteras u otras actividades de laboreo mineras), que den como resultado material suelto en los cauces o quebradas, donde todo el material podría ser movido o removido cuesta abajo, c) Obras civiles como rutas y caminos que fracturan el terreno y contribuyen a incrementar el grado de vulnerabilidad por sobrecarga o humedecimiento del mismo (Nuñez Juárez y Choquenaira 2018).

Coincidiendo con lo propuesto anteriormente por Nuñez Juárez y Choquenaira (2018), en la zona de estudio se pudo identificar un gran número de caída de rocas en la sierra Chica de Zonda, cerro Blanco y cerro Negro que podría estar ligada a una modificación del talud de los afloramientos rocosos asociados a la construcción de obras civiles (dique Punta Negra y Ruta Provincial N° 12) y vibraciones constantes por la circulación de automóviles, maquinaria pesada asociada a laboreos ligados a proyectos mineros metalíferos, no metalíferos y remoción de material (Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro 2019) y a las actividades recientes de voladuras en el Cerro El Tambolar por la construcción del dique homónimo.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que los índices más influyentes que generaron las caídas de rocas,

son la pendiente, la orientación de las laderas y la litología.

Este trabajo coincide con lo propuesto por Esper y Perucca (2013) para la zona del foco sísmico, en la cual los deslizamientos identificados tienen diversos factores de control, incluida la litología y la pendiente, que podrían ser considerados los factores principales de control que provocan la inestabilidad de las rocas. A su vez, plantean un origen sísmico relacionado con fallas cuaternarias como factor desencadenante de los procesos de remoción en masa, y una fuerte evidencia que permitiría la correlación de los procesos de remoción en masa con terremotos prehistóricos. No obstante, el análisis de la frecuencia, magnitud, profundidad y distribución paleosismológica, prehistórica e histórica de los terremotos en el área, fue importante para concluir en este estudio, que muchos deslizamientos antiguos probablemente fueron provocados por una sismicidad fuerte y continua. Sin embargo, no se pudo relacionar directamente algún deslizamiento con un determinado evento desencadenante o falla. En particular, un mecanismo de activación sísmica está validado por la existencia de características de licuefacción a menos de 30 km al sur del área de los deslizamientos. Las rocas en este lugar están fuertemente plegadas y falladas, y los deslizamientos están condicionados por la orientación desfavorable de la estratigrafía, paralelos a la pendiente (Esper y Perucca 2013). En contraposición, dado que solo se registraron caídas y reactivación de rocas en este análisis, y no deslizamientos, esto se podría deber a la falta de material suelto disponible para ser removido.

Fauqué et al. (2008) identificaron concentración de avalanchas de rocas y las zonas litocinémicas en sus depósitos, que indican movimientos secos, validan los disparadores sísmicos en la zona de la sierra del Tontal y del cordón del Cerro Alto de Arenas, a 30 km aproximadamente al oeste de la zona de estudio.

Junquera-Torrado et al. (2019) presentan un inventario histórico de deslizamientos, en el cual las mayores concentraciones de estos procesos se localizan en áreas donde se ubican las mayores elevaciones y gradientes de pendientes de Precordillera Central y Occidental. La zona de mayor deformación, alineada al hundimiento de la dorsal de Juan Fernández, genera mayores elevaciones y pendientes en las laderas orientales debido al traslado de la deformación hacia el antepaís y asociado a la mayor actividad neotectónica, mecanismo disparador de procesos de remoción en masa. Estos autores concluyen que estas magnitudes coinciden con las estimadas a partir de estudios paleosismológicos y neotectónicos de fallas cuaternarias locales en su zona de trabajo (Mw: 5.6 a 7.6) coincidiendo con los resultados obtenidos en este trabajo.

Según Rodríguez et al. (1999), un sismo debe ser del orden de Ms: 5.4 para generar caídas de roca y deslizamientos, y Ms: 6.5 para avalanchas de rocas. Si bien en el presente trabajo, el sismo registrado fue de 6.4 Mw, y los estudios preliminares suponen como fuente sismogénica la falla de las Osamentas, no se observó ningún proceso del tipo avalancha, y las caídas nuevas producidas o bien reactivadas, se identificaron hasta aproximadamente los 60 kilómetros del foco, difiriendo con lo propuesto por Junquera-Torrado et al. (2019), quienes postulan que los deslizamientos en su mayoría se localizan a una distancia promedio de 7.8 kilómetros y una distancia máxima de 20 km desde la falla cuaternaria más cercana que indica una conexión potencial entre colapsos y fuentes paleosísmicas. Este hecho se podría deber a condicionamientos previos y a la disponibilidad de material para ser deslizado.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que un gran porcentaje del desarrollo de los procesos de remoción en masa analizados está ubicado en la zona de la faja plegada y corrida de Precordillera Oriental, al norte del epicentro del sismo. Esto podría deberse a condiciones geomorfológicas y litológicas del terreno previas al sismo que potenciaría el desencadenamiento de 507 caídas de rocas en esta zona. Por lo tanto, a partir del estudio realizado se identificaron que los principales condicionantes para la generación y/o reactivación de estos procesos serían la pendiente, orientación de laderas y la litología.

A partir de pendientes superiores a los 30 °, ocurrieron la mayor parte de las caídas de rocas, sin embargo, se observaron casos en los que la pendiente presentaba valores menores. En segundo lugar, el índice que indica una mayor influencia es la orientación de laderas, ya que en su mayoría éstas se ubican hacia el Este. Esto se podría deber en parte a que la morfología de las sierras de Precordillera Central presentan mayores pendientes en sus laderas orientales, mientras que las laderas occidentales son más extensas y de pendientes más suavizadas. Estas pendientes son producto de las fallas pre-cuaternarias, de vergencia oriental que elevan tales cordones montañosos. Comparando la ubicación de las caídas de roca y la litología aflorante, se observa que las unidades devónicas de la Formación Punta Negra, fueron las que reportaron más colapsos, por lo que el patrón de distribución de los deslizamientos en frentes tectónicos activos con respecto a los eventos sísmicos desencadenantes son una pieza clave para comprender la relación entre ambos fenómenos. Esto ya fue observado previamente por Fauqué et al. (2006, 2008)

para esta zona de estudio.

Si bien no se obtuvieron registros de medición de precipitaciones, en los días previos al evento sísmico se registraron diversas tormentas, algunas de carácter torrencial en la provincia. Este factor, podría haber contribuido a una situación de inestabilidad en las laderas saturando las grietas de rocas y suelos. Además, no debe descartarse el factor antrópico que favorece también a la ocurrencia de las caídas de rocas.

El inventario de caídas de rocas realizado en este trabajo puede contribuir y considerarse como un mapa base para futuras investigaciones que permitan examinar la evolución de los procesos de remoción en masa provocados por sismos en los próximos años. O bien, para determinar otros factores condicionantes, además de los mencionados, como la amplitud topográfica, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Dres. Daniel Flores y Roberto Giménez por el aporte de fotografías en los sectores de Sierras Azules y Sierra Chica de Zonda. Dicha colaboración sirvió para evidenciar las caídas de rocas acontecidas en el sismo del día 18 de enero de 2021.

REFERENCIAS

- Acosta, G., Rodríguez, A., Euillades, P., Euillades, L., Ruiz, F., Rosell, P., Sanchez, M., Leiva, F., Ariza J. y García, H. 2021. Detection of active landslides by DInSAR in Andean Precordillera of San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 108: 103-205.
- Allmendinger, R., Figueroa, D., Snyder, E., Beer, J., Mpodozis, C. y Isacks, B. 1990. Foreland shortening and crustal balancing the Andes at 30°S latitude. *Tectonics* 9(4): 789-809.
- Alvarado, P. y Beck, S. 2006. Source Characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8): *Earth and Planetary Science Letters* 243 (3-4): 615-631.
- Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, P. y Beck, S. 2007. Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca plate. Central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International* 171(1): 419-434.
- Anselmi, G., Cegarra, M.I., Gaido, M.F., Yamin, M., Pereyra, F.X. y Herrmann, C.J., 2021. Hoja Geológica 3169-27 Barreal, provincia de San Juan. *Boletín* 444: 110 p., Buenos Aires.
- Antinao, J.L. y Gosse, J. 2009. Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile 32°-34.5°S: tectonic control and significance for quaternary landscape evolution. *Geomorphology* 104(3-4):117-133.
- Audemard, F., Perucca, L., Pantano, P., Ávila, C., Onorato, R., Vargas, N., Alvarado, P. y Viète, H. 2016. Holocene compression in the Andes Precordillera. in the Acequión region (San Juan Province. Argentina):

- Geomorphic. (micro- and meso-) tectonic and (direct and indirect) paleoseismic evidence. *Journal of South American Earth and Sciences* 67: 140-157.
- Baldis, B. y Chebli, G. 1969. Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina. 4° Jornadas Geológicas Argentinas Mendoza. Actas 14: 47-65, Mendoza.
- Bastías, H. 1986. Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 147p., San Juan.
- Bastías, H., Weidmann, N. y Pérez, M. 1984. Dos zonas de fallamiento Pliocuaternario en la Precordillera de San Juan. 9° Congreso Geológico Argentino. Actas 2: 329-341, San Carlos de Bariloche, Rio Negro.
- Cardó, R., Díaz, I., Bordonaro, O. y Cardinali, A. 2020. Hoja Geológica 3169-34 Los Berros, provincia de San Juan. Servicio Geológico Mineero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 397: 36 p., Buenos Aires.
- Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro -CEFOCCA- 2019. Atlas Socioeconómico Multimedia de la Provincia de San Juan. <http://www.cefocca.unsj.edu.ar/>. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.
- Comínguez, A.H. y Ramos, V.A. 1991. La estructura profunda entre Precordillera y Sierras Pampeanas de la Argentina: evidencia de la sísmica de reflexión profunda. *Revista Geológica de Chile* 18: 3-14.
- Cortés Granados, V. 2010. Mecanismos de disparo de los procesos de remoción en masa en el valle de Orosí. *Reflexiones* 89(1): 9-28.
- Costa, C., Rockwell, T., Paredes, J. y Gardini, C. 1999. Quaternary deformations and seismic hazard at the Andean orogenic front (31–33, Argentina): a paleoseismological perspective. 4° International Symposium on Andean Geodynamics, Actas: 187–191, Goettingen.
- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastías, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. U.S. Geological Survey Open-File Report (108): 75.
- Cruden, D. M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 43(1): 27-29.
- Denier, P., Personius, S. y Arias, O. 1991. Generalidades sobre los efectos geológicos del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Especial Terremoto de Limón*: 29-38.
- Diario La Nación 2021. <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/san-juan-el-sismo-dano-unas-30000-viviendas-y-destruyo-otras-3000-nid29012021>
- Esper Angillieri, M. y Perucca, L.P. 2013. Mass movement in Cordón de las Osamentas, de La Flecha river basin, San Juan, Argentina. *Quaternary International* 301: 150–157.
- Fauqué, L., Cortés J.M., Folguera, A. y Etcheverría, M. 2000. Avalanchas de rocas asociadas a neotectónica en el valle del río Mendoza, al sur de Uspallata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(4): 419–423.
- Fauqué, L., Anselmi, G., Cegarra, M., Gaido, F., Yamín, M. y Wilson, C. 2006. Deformación y movimientos de ladera en el área del proyecto de embalse Caracoles. San Juan, Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 35-38, Antofagasta.
- Fauqué, L., Cegarra, M., Wilson, C., Yamín, M., Gaido, F. y Anselmi, G. 2008. Procesos geodinámicos en el área del proyecto hidroeléctrico Los Caracoles. San Juan, Argentina. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 272-273, San Salvador de Jujuy.
- González-Díaz, E.F., Folguera, A., Costa, C.H., Wright, E. y Ellisondo, M. 2006. Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36°-38°S: una propuesta de inducción sísmica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(2):197–217.
- Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H. y Engdahl, E.R. 2000. Geodynamics of flat slab subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics* 19: 814-833.
- Guzmán Marín, P., Lira, M.P., Tassara, A. y Urrutia, R. 2015. El Sismo de 1960 (Mw 9.5) y sus secuelas en la Cuenca del Lago Maihue. Riesgos y peligros geológicos asociados al Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui. 14° Congreso Geológico Chileno, Actas 4: 202-205, La Serena.
- Harp, E.L., Wilson, R.C. y Wiecek, G.F. 1981. Landslides from the February 4, 1976, Guatemala earthquake. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1204-A, 35 p.
- Harp, E.L., Tanaka, K., Sarmiento, J. y Keefer, D.K. 1984. Landslides from the May 25–27, 1980, Mammoth Lakes, California, Earthquake Sequence, U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map 1-1612.
- Hauser, A. 2000. Remociones en masa en Chile (versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología.
- Hermanns, R.L. y Strecker, M.R. 1999. Structural and lithological controls on large quaternary rock avalanches (sturzstroms) in arid Northwestern Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 111(6): 934–948.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., Garcia, A.V., Gómez, J.S. y Strecker, M.R. 2001. Neotectonics and catastrophic failure of mountain fronts in the southern intra-Andean Puna Plateau, Argentina. *Geology* 29(7): 619–622.
- INPRES 2021. <https://www.inpres.gob.ar/desktop/epicentro1.php?s=20210119024622>
- Jiménez Jara, D. 2011. Sistema de información geográfica de deslizamientos inducidos por sismo. Tesis de Grado, Pontificia Universidad Javeriana (inédita), 98 p., Bogotá.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos, V y Ando, C. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.
- Junquera-Torrado, S., Moreiras, S.M. y Sepúlveda, S., 2019. Distribution of landslides along the Andean active orogenic front (Argentinean Precordillera 31°–33° S). *Quaternary International* 512: 18–34.
- Junquera-Torrado, S., Moreiras, S.M., Rodríguez-Peces, M.J. y Sepúlveda,

- da, S.A. 2021. Linking earthquake-triggered paleolandslides to their seismic source and to the possible seismic event that originated them in a portion of the Argentine Precordillera (31°–33° S). *Natural Hazards* 106(1): 43-78.
- Keefer, D.K. 1984. Landslides Caused by Earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95: 406–421.
- Keefer, D.K. 1994. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. 25° Binghamton Symposium in Geomorphology, Geomorphology and Natural Hazards: 265-284, Binghamton, Estados Unidos.
- Keefer, D.K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review. *Surveys in geophysics* 23(6): 473-510.
- Köppen, W. 1948. *Climatología fonda de cultura económica*, 478, Buenos Aires.
- Lara Ferrero, G. 2015. Análisis de la Actividad Tectónica Cuaternaria en la Depresión Maradona-Bachongo (31°35'-31°52'LS). *Precordillera Central*. Provincia de San Juan. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (Inédita), 249p. San Juan.
- Lara Ferrero, G., Lince Klinger, F., Perucca, L., Rojo, G., Vargas, N. y Leiva, F. 2017. Multiple geophysical methods examining neotectonic blind structures in the Maradona valley. *Central Precordillera (Argentina). Tectonophysics* 712-713: 634–642.
- Lara Ferrero, G., Perucca, L., Rothis, M., Pantano, A. y Sáez, M. 2018. Quaternary tectonic activity of Maradona fault system. *Central Precordillera. Argentina. Andean Geology* 45(2): 145–160.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(6): 687-711.
- Mardones Flores, M. y Rojas Hernández, J. 2012. Procesos de remoción en masa inducidos por el sismo del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande* 53: 57-74.
- Martos, L. 1987. Evidencias de movimientos neotectónicos en una terraza de edad Holocena, La Rinconada, San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 263–265, Tucumán.
- Martos, L. 1993. Evidencias de actividad tectónica en el Pleistoceno Superior-Holoceno, Quebrada del Molino, Pocito, San Juan, República Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 258–265, Mendoza.
- Menéndez, P. 1991. Atenuación de las intensidades del sismo del 3 de marzo de 1985 en función de la distancia a la zona de ruptura y del tipo de suelo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile (inédita), 254 p, Chile.
- Meunier, P., Hovlus, N. y Haines, J. 2007. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophysical Research Letters* (34) 20.
- Moreiras, S.M. 2006. Chronology of a Pleistocene rock avalanche probable linked to neotectonic, Cordón del Plata (Central Andes) Mendoza-Argentina. *Quaternary International* 148(1): 138–148.
- Moreiras, S. y Banchig, A. 2008. Further evidences of Quaternary activity of the Maradona faulting. *Precordillera Central. Argentina Resumen Expandido. 7° International Symposium on Andean Geodynamics* 7: 344-347, Nice, France.
- Moreiras, S.M. y Sepúlveda, S.A. 2015. Megalandslides in the andes of central Chile and Argentina (32°-34°S) and potential hazards. *Geological Society of London, Special Publications* 399(1): 329–344.
- Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 1989. *The Andes of Chile and Argentina. Earth Science Series* 11: 59–90.
- Moya, S., Sepúlveda, S. A., Serey, A., García, M., y Montalva, G. 2015. Remociones en masa generadas por el terremoto del Maule de 2010 en la Península de Arauco. 14° Congreso Geológico de Chile Actas, La Serena.
- Nuñez Juárez, S. y Choquenaira, G. 2018. Inspección Geológica en el asentamiento humano Sol Naciente III Etapa. Región y Provincia Lima. Sector Energía y Minas (INGEMMET). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Ortiz, A. y Zambrano, J.J. 1981. La provincia geológica Precordillera Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino. Actas 3: 59-74, San Luis.
- Owen, L.A., Kamp, U., Khattak, G.A., Harp, E.L., Keefer, D.K. y Bauer, M.A. 2008. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake. *Geomorphology* 94(1-2): 1-9.
- Penna, I.M., Hermanns, R.L., Niedermann, S. y Folguera, A. 2011. Multiple slope failures associated with neotectonic activity in the Southern Central Andes (37°–37°30' S), Patagonia Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 123(9-10):1880–1895.
- Pereyra, B.R. 1993. *Clima de San Juan. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan*, San Juan.
- Perucca, L. 1990. Sistema de Fallamiento La Dehesa Maradona-Acequiión. San Juan. Argentina. 11° Congreso Geológico Argentino. Actas 2: 431-434, San Juan.
- Perucca, L.P. y de Dios Paredes, J. 2003. Fallamiento cuaternario en la zona de La Laja y su relación con el terremoto de 1944, Departamento Albardón, San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20(1): 20-26.
- Perucca, L.P. y Onorato, R. 2011. Fallas con actividad cuaternaria en el corredor tectónico Matagusanos-Maradona-Acequiión entre los ríos de la Flecha y del Agua, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68(1): 39-52.
- Perucca, L. y Vargas, N. 2014. Neotectónica de la provincia de San Juan. centro-oeste de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66: 291-304.
- Perucca, L., Lara, G. y Vargas, N. 2012. Nueva evidencia de actividad tectónica cuaternaria en la depresión Zonda-Maradona. Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69: 97-105.
- Perucca, L.P., Audemard, F.A, Pantano, A., Ávila, C.R., Onorato, M. y Vargas, H.N. 2013. Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre

- Precordillera Central y Oriental. Provincia de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 70: 291-302.
- Pilger, R.H. 1981. Plate reconstructions aseismic ridges and low-angle subduction beneath the Andes. Geological Society American Bulletin 92: 448-456.
- Plafker, G., Ericksen, G.E. y Fernandez Concha, J. 1971. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake. Bulletin of the Geological Society of America 61(3): 543-578.
- Poblete, A. y Minetti, J. 1989. Los mesoclimas de San Juan, Primera y Segunda parte: San Juan, Argentina, Centro de Investigaciones de San Juan, Universidad Nacional de San Juan. Boletín, 4, Informe técnico 11.
- Ramos, V. 1988. The tectonics of the central Andes: 30° to 33° S latitude. En: Clark, S., Burchfield, D. (eds), Processes in Continental Lithospheric Deformation. Geological Society of America, Special Paper 218: 31-54.
- Ramos, V. 1999. Los depósitos sinorogénicos terciarios de la región Andina Geología Argentina. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29 22(29): 651-691, Buenos Aires.
- Ramos, V. y Vujovich, G. 2000. Descripción de la Hoja geológica 3169-IV, provincia de San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 243: 82 p., Buenos Aires.
- Ramos, V., Cegarra, M., Lo Forte, G. y Comínguez, A. 1997. El frente orogénico en la Sierra de Pedernal (San Juan Argentina): su migración a través de los depósitos orogénicos. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 111: 1709-17, Antofagasta.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Pérez, D.J. 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.
- Rodríguez, C.E, Bommer, J.J. y Chandler, R.J. 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18(5): 325-346.
- Rolleri, E.O. 1969. Rasgos tectónicos generales del valle de Matagusanos y de la zona entre San Juan y Jocolí provincia de San Juan. República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 24: 40-412.
- Serey, A., Piñero-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S.A., Poblete, F., Petley, D.N. y Murphy, W. 2019. Landslides induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: a comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors. Landslides 16(6): 1153-1165.
- Siame, L.L., Bellier, O. y Sebrier, M. 2006. Active tectonics in the Argentine Precordillera and western sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 61: 604-619.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. Special report 176: 11-33.
- Zapata, T.R. y Allmendinger, R.W. 1996. The thrust front zone of the Precordillera. Argentina: a Thick-skinned triangle zone. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 80: 359-381.