

# ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA EVOLUCIÓN DEL PAISAJE CUATERNARIO EN EL VALLE DE IGLESIA, SAN JUAN

Laura P. PERUCCA<sup>1,2</sup> y Liliana M. MARTOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CONICET, Gabinete de Neotectónica. INGENIO-F.C.E.F. y N., Universidad Nacional de San Juan. Email: lperucca@unsj-cuim.edu.ar

<sup>2</sup> Departamento Geología. F.C.E.F. y N., Universidad Nacional de San Juan. Email: lmartos@unsj-cuim.edu.ar

## RESUMEN

El valle longitudinal de Iglesia es una depresión tectónica regional limitada al oeste por la unidad montañosa Cordillera Frontal y al este por la Precordillera occidental. Las formas del paisaje resultante en la región se deben a procesos degradacionales y agradacionales vinculados a la acción glacial, periglacial, fluvial y aluvial, así como a la actividad neotectónica y cambios climáticos. La generación de los amplios niveles aluviales cuaternarios se relaciona a condiciones climáticas pasadas más frías y húmedas que las actuales. Las mayores precipitaciones níveas y pluviales registradas durante el Pleistoceno posibilitaron el transporte y depositación de detritos, generando cubiertas aluviales cuyo espesor aumenta de oeste a este. Estas condiciones climáticas alternaron con épocas más áridas, similares a la actual, en las que prevaleció la erosión vertical de los arroyos, dando origen a un paisaje de niveles escalonados. La presencia de fallas con actividad cuaternaria indica además un fuerte control estructural en la evolución del paisaje durante el Pleistoceno-Holoceno, favoreciendo eficazmente el reinicio de la erosión vertical, dando por finalizado un ciclo de erosión-acumulación y el inicio del siguiente.

Palabras clave: *Geomorfología, Neotectónica, Niveles aluviales, Paisaje, Iglesia.*

**ABSTRACT:** *Preliminary analysis of the Quaternary landscape evolution in the Iglesia Valley, San Juan.* The north-south valley of Iglesia is a regional tectonic depression limited to the west by the Cordillera Frontal and to the east by western Precordillera. The forms of the resulting landscape are related to glacial, periglacial, fluvial and alluvial action, aggradational and degradational processes, as well as to the neotectonic activity and climatic changes. The generation of large Quaternary alluvial fan levels is related to past climatic conditions, colder and more humid than the present ones. Abundant snowfalls and rains during the Pleistocene made possible the detritus deposition, generating alluvial covers with thickness increasing towards the east. These climatic conditions alternated with arid intervals, similar to the present, when vertical erosion of streams prevailed, forming a landscape of stepped levels. In addition, the presence of faults with Quaternary tectonic activity indicates a strong structural control in the evolution of the landscape during the Pleistocene - Holocene, effectively starting vertical erosion and finishing a cycle of erosion-accumulation and the beginning of the following one.

Keywords: *Geomorphology, Neotectonic, Alluvial levels, Landscape, Iglesia.*

## INTRODUCCIÓN

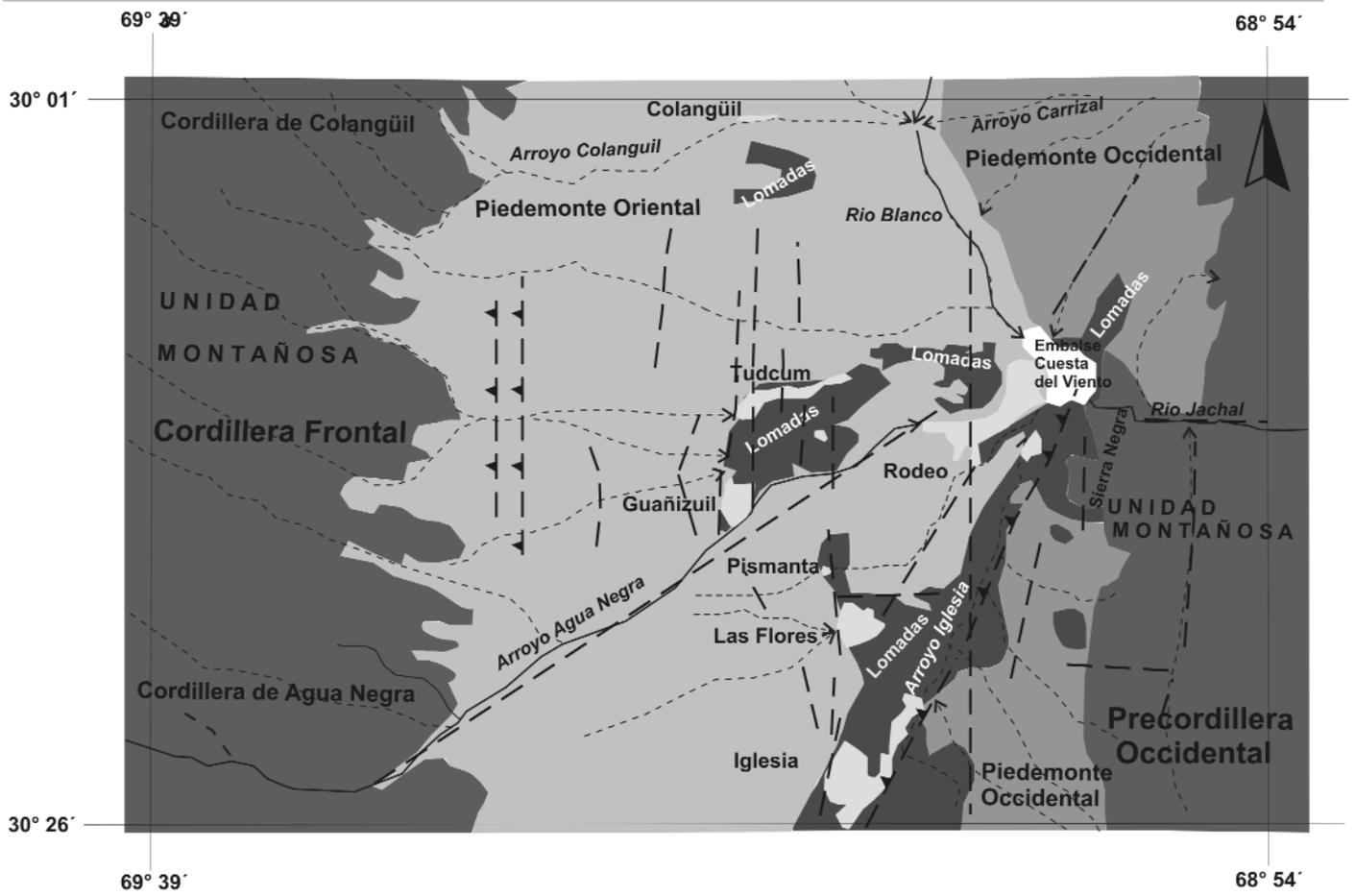
El área de trabajo se ubica en el sector centro occidental de la provincia de San Juan, entre los 30° y 30°20'S y 69° y 69°30'O (Fig. 1). De este a oeste abarca parte del borde occidental de la Precordillera occidental, el valle de Iglesia y la Cordillera Frontal. En la Precordillera, los principales cuerpos montañosos poseen rumbo norte-sur, como la sierra Negra y los Altos del Colorado, cuyas cumbres alcanzan los 3.500 m s.n.m. Los cordones cordilleranos más importantes son la cordillera de Colangüil y Agua Negra, las que superan los 5.000 m s.n.m. El drenaje superficial conforma por el norte la cuenca del río Jáchal, con el río

Blanco y sus tributarios, entre los que se destacan los provenientes de Cordillera Frontal tales como el arroyo Colangüil y Agua Negra. Por el este, proveniente de Precordillera occidental, el principal tributario del río Blanco es el arroyo Carrizal y por el sur, el arroyo Iglesia.

Las poblaciones más importantes en el valle son: Rodeo, Colangüil, Las Flores, Iglesia y Tudcum (Fig. 1), ubicadas en el valle del río Blanco. Otros asentamientos menores son Guañizuil y Pismanta. Las poblaciones mencionadas están comunicadas con la ciudad de San Juan por medio de la ruta provincial 436. La ruta internacional 150 permite la comunicación con la ciudad de Jáchal al este y con Chile por el oeste.

La rigurosidad del clima actual se manifiesta con las extremas temperaturas invernales en la cordillera (de hasta -30°C), intensa heliofanía, grandes amplitudes térmicas, humedad ambiente mínima, nevadas invernales y escasísimas precipitaciones pluviales.

El clima en la Precordillera occidental y en el valle es árido-desértico, con grandes amplitudes térmicas diarias y anuales, elevada heliofanía, transparencia atmosférica y escasa humedad. El régimen pluviométrico es continental, con lluvias exclusivamente estivales y con muy baja frecuencia media de días con lluvia. Según la clasificación de Köppen (1936) es del tipo B W K, (B es la precipitación media anual inferior al límite de sequía, W es



**REFERENCIAS**

-  Unidad Montañosa
-  Lomadas Neógenas
-  Piedemonte Oriental
-  Piedemonte Occidental
-  Area urbanizada/cultivada
-  Falla inversa con actividad cuaternaria
-  Falla con actividad durante el Cuaternario
-  Río efímero
-  Río permanente

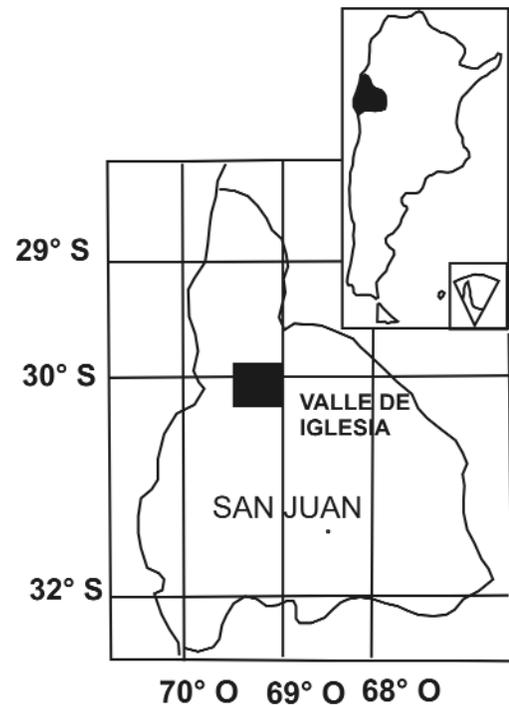


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

desierto y  $K$  es la temperatura media anual inferior a 18 °C (en Rodeo de 15,7°C), pero superior a 18°C en el mes más caluroso (en enero 23°C). Los vientos predominantes provienen del sector sur-este y durante los meses de agosto-septiembre el viento Zonda (tipo *föhn*) y viento norte, son casi constantes.

Los depósitos y geformas reconocidas en el valle de Iglesia, sugieren condiciones climáticas pasadas diferentes de las actuales, planteando en este trabajo un análisis paleoclimático tendiente a comprender su influencia en la evolución del paisaje, sumando el control de la tectónica activa del Pleistoceno-Holoceno, como factor influyente en tal evolución.

Las diferentes geformas de acumulación y erosión reconocidas en el área, indicarían cambios en las condiciones climáticas del área, tendientes a una mayor aridificación durante el clima actual, que implicó la disminución de la capacidad de transporte de las corrientes fluviales, predominando en la actualidad los procesos eólicos. La actividad fluvial se restringe a los ríos y arroyos mencionados, que escurren en sus cauces principales, desbordando ocasionalmente durante las intensas precipitaciones pluviales estivales, o en aquellos años de mayores precipitaciones nievas en cordillera.

La ausencia de cubierta vegetal en la superficie tope de los abanicos aluviales de distintas generaciones, contribuye a la efectividad de las escasas corrientes mantiformes y/o filiformes, a la acción de la meteorización física y principalmente al accionar de los vientos, muy frecuentes en la región, provocando procesos de glaciplanación, buen desarrollo de pavimento, barniz del desierto y fenómenos de crioclastismo.

## METODOLOGÍA

Los métodos aplicados en el análisis del valle de Iglesia están basados en la interpretación y análisis digital de los rasgos geomorfológicos del relieve haciendo uso de fotografías aéreas de escala 1:30.000 suministradas por la Secretaría de Minería

de la provincia e imágenes satelitales Landsat TM de 30 y 15 m de resolución.

Para el análisis de pendientes se confeccionó un mapa en ambiente GIS a partir de la creación de un modelo digital de terreno (MDT). Las altitudes fueron obtenidas como resultado de la digitalización parcial de Cartas Topográficas del Instituto Geográfico Militar.

Las tareas de campo consistieron en un análisis detallado de las geformas y trincheras naturales más relevantes.

## MARCO TECTÓNICO Y GEOLOGÍA

La porción occidental de Sudamérica posee una compleja morfología, con un margen occidental activo, en el cual la topografía y sismicidad reflejan la deriva de las placas de Nazca, Antártida y Sudamérica. Esta convergencia comenzó hace aproximadamente 200 millones de años con la subducción de sucesivas placas oceánicas hacia el este por debajo de la placa Sudamericana (Uyeda y Kanamori 1979).

Entre los 28° y 32° Sur, la placa de Nazca se introduce por debajo de la Sudamericana con actitud subhorizontal a unos 100 km de profundidad, a una tasa de 6,3 cm/año (Pardo Casas y Molnar 1987, Somoza 1998, Kendrick *et al.* 2003). Esta subhorizontalización se inició entre los 8 y 10 Ma (Jordan y Gardeweg 1987, Kay *et al.* 1991).

El centro de Chile (a los 30° S aproximadamente) se caracteriza por una oblicuidad intermedia del vector de convergencia de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Este modo de subducción oblicuo afecta la distribución de la deformación y la morfología resultante, favoreciendo la ocurrencia de fallas con desplazamiento horizontal.

Siame *et al.* (1996) consideraron que tanto el valle de Calingasta-Iglesia como la Precordillera pueden ser vistas a los 30°-31°S, como una zona transpresiva de escala cortical, cuya deformación se distribuye con un movimiento horizontal lateral derecho a lo largo de la zona de fallamiento El Tigre y un movimiento inver-

so en la faja plegada y corrida de la Precordillera.

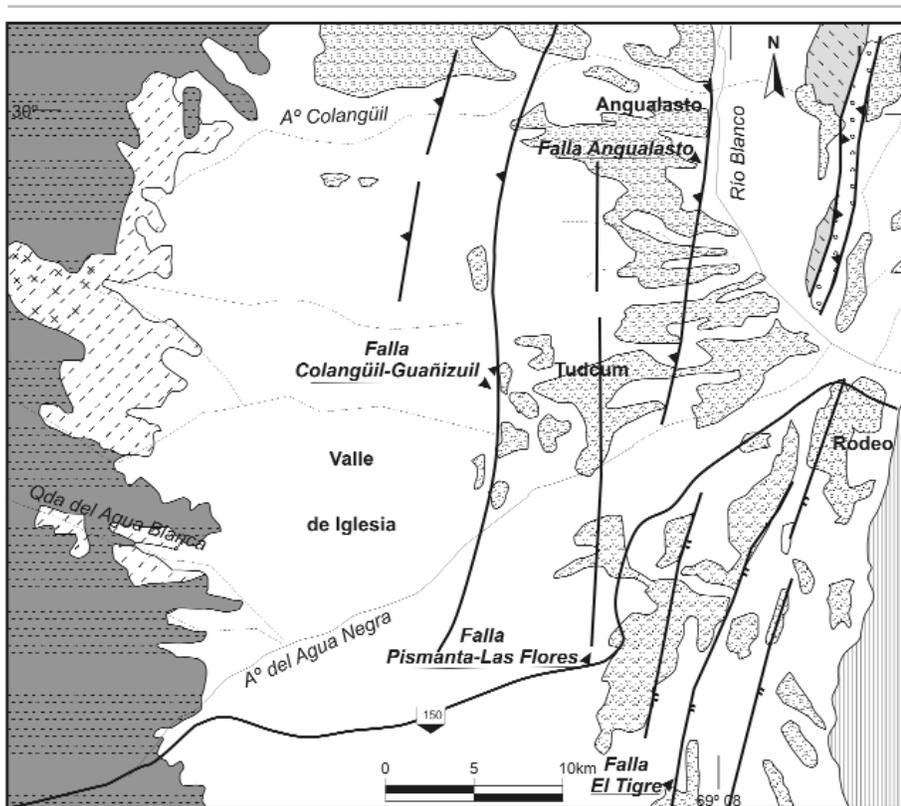
Alvarez-Marrón *et al.* (2006) interpretaron, a partir del análisis de perfiles sísmicos en el valle de Iglesia y de distintos afloramientos en un perfil oeste-este, una estructura en flor positiva para el Neógeno en esta porción de Precordillera. Consideraron que estos modelos no reflejarían completamente el estilo estructural de sistemas de fajas corridas de piel fina propuesto por otros autores (Allmendinger *et al.* 1990, Jordan *et al.* 1993).

El marco geológico del valle de Iglesia es el resultado de complejos procesos geodinámicos que resultan de la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica.

En el área cordillerana afloran grauvacas, limoarcilitas y psamitas de edad carbonífera superior-pérmica inferior (Formación Agua Negra), granitos y granodioritas pérmicas, granitos del Mesozoico del batolito de Colanguil, sedimentitas continentales del Neógeno (Grupo Iglesia) y depósitos del Pleistoceno-Holoceno (Fig. 2).

En Precordillera Occidental, las unidades estratigráficas más antiguas corresponden a sedimentitas ordovícicas y devónicas (Formaciones Yerba Loca y Punilla) cubiertas por depósitos neopaleozoicos (Formación Malimán), en los que se alojan cuerpos ácidos hipoabisales del Pérmico inferior y el Triásico inferior, asignados al ciclo magmático Choiyoi. El Paleógeno-Neógeno está representado por las formaciones continentales del Grupo Iglesia (Wetten 1975), la inferior denominada Formación Lomas del Campanario y la superior llamada Formación Las Flores (Fig. 2).

La Formación Lomas del Campanario está compuesta por una fase inferior aglomerádica con andesitas, dacitas, tobas y bombas volcánicas de color castaño rojizo, verde grisáceo o gris y una fase superior conglomerádica con estratificación cruzada y con intercalaciones de diatomitas. La Formación Las Flores, está constituida por una sucesión de arcilitas y limolitas bien estratificadas en gruesos bancos muy compactos y areniscas finas de tonos rojizos, castaños y amarillo claro, con interca-



## REFERENCIAS

- Pleistoceno-Holoceno (depósitos pedemontanos indiferenciados)
- Mioceno superior (Aglomerados, conglomerados, areniscas) Grupo Iglesia
- Pérmico medio (Granito Los Puentes)
- Pérmico inferior (Granodiorita Las Piedritas)
- Carbonífero superior - Pérmico (Areniscas, grauvacas, lutitas) Formación Agua Negra
- Carbonífero (Conglomerados, areniscas, lutitas) Formación Malimán
- Devónico-Carbonífero (Areniscas, grauvacas, lutitas) Formación Punilla
- Ordovícico (Areniscas, lutitas y limolitas) Formación Yerba Loca
- Falla inversa
- Falla con indicación de labio hundido
- Río temporario
- Río permanente
- Ruta Internacional

Figura 2: Mapa geológico del Valle de Iglesia.

de Cordillera Frontal. Estimó el espesor en 50 m el cual disminuye hacia el oeste.

Los depósitos más recientes ocupan la posición topográfica más baja, formando secuencias de tipo aluvial cuya composición litológica está integrada por clastos de areniscas, grauvacas, lutitas y variedad de rocas ígneas. Los depósitos de barreal, limos, arcillas y arenas finas se ubican en la parte más baja de la depresión tectónica del valle de Iglesia y constituyen los niveles de base locales de los cursos efímeros que atraviesan el piedemonte.

Según Jordan *et al.* (1993), la cuenca de Iglesia habría evolucionado a un sistema de sobrecorrimientos en la Precordillera Central, con vergencia al este, que a la latitud del valle de Iglesia, comenzó a actuar aproximadamente hace 20 Ma. Este conjunto de fallas se encontrarían unidas a una rampa profunda o superficie basal de despegue sobre la cual la cuenca "cabalga" en forma pasiva, como una cuenca *piggyback* (Allmendinger *et al.* 1990).

Alvarez-Marrón *et al.* (2006) interpretaron que la sedimentación en la región tuvo dos episodios de deformación compresivos, uno durante el Paleozoico con grandes acortamientos y otro desde el Neógeno al presente, de carácter transpresivo que modificó estructuras antiguas. Estos efectos combinados de compresión inicial y posteriormente transpresión habrían causado dificultades en la interpretación de las estructuras, ya que la deformación neógena no se adaptaría a un sistema de fajas plegadas y corridas, sino a una geometría en flor positiva (Alvarez-Marrón *et al.* 2006).

## FALLAS CON ACTIVIDAD TECTÓNICA CUATERNARIA

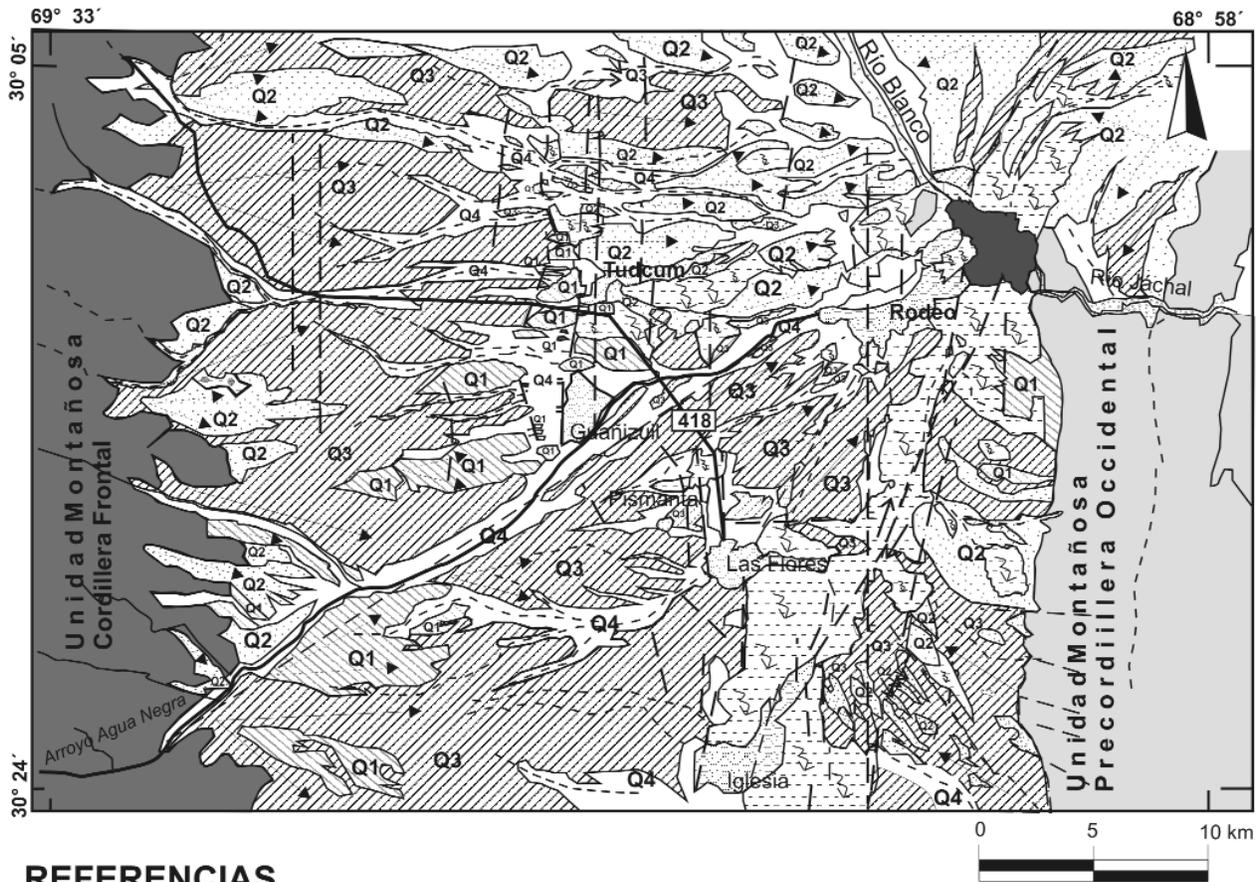
Las evidencias de actividad tectónica durante el Cuaternario se encuentran tanto en el piedemonte de la Cordillera Frontal en las fallas Colangüil, Pismanta y Angualasto, como en el de la Precordillera (falla El Tigre; Bastias y Uliarte 1991, Siame *et al.* 1996).

La falla El Tigre (Bastias 1985, Siame *et al.* 1997) afecta entre los ríos Jáchal y San

laciones de yeso laminar. Los afloramientos de esta unidad se localizan al oeste de Pismanta hasta Colangüil. Se dispone en forma concordante sobre la Formación Lomas del Campanario (Fig. 3).

Basados en datos sísmicos, Beer (1990) y Beer *et al.* (1990) determinaron que la cuenca de Iglesia presenta en su centro 3,5 km de espesor de sedimentitas del Neógeno, adelgazándose hacia el este y el oeste, y hacia el norte y sur.

El Cuaternario en el sector occidental del valle, está constituido por clastos de grauvacas, cuarcitas, granodioritas, etc. El tamaño de los clastos llega a bloques de más de 50 cm de diámetro. Furque (1979) definió la Formación Tudcum que se distribuye al oeste de los ríos Iglesia y Blanco cubriendo discordantemente los depósitos del Neógeno y constituida por conglomerados medianos a finos compactos con clastos de rocas ígneas y rocas sedimentarias



**REFERENCIAS**

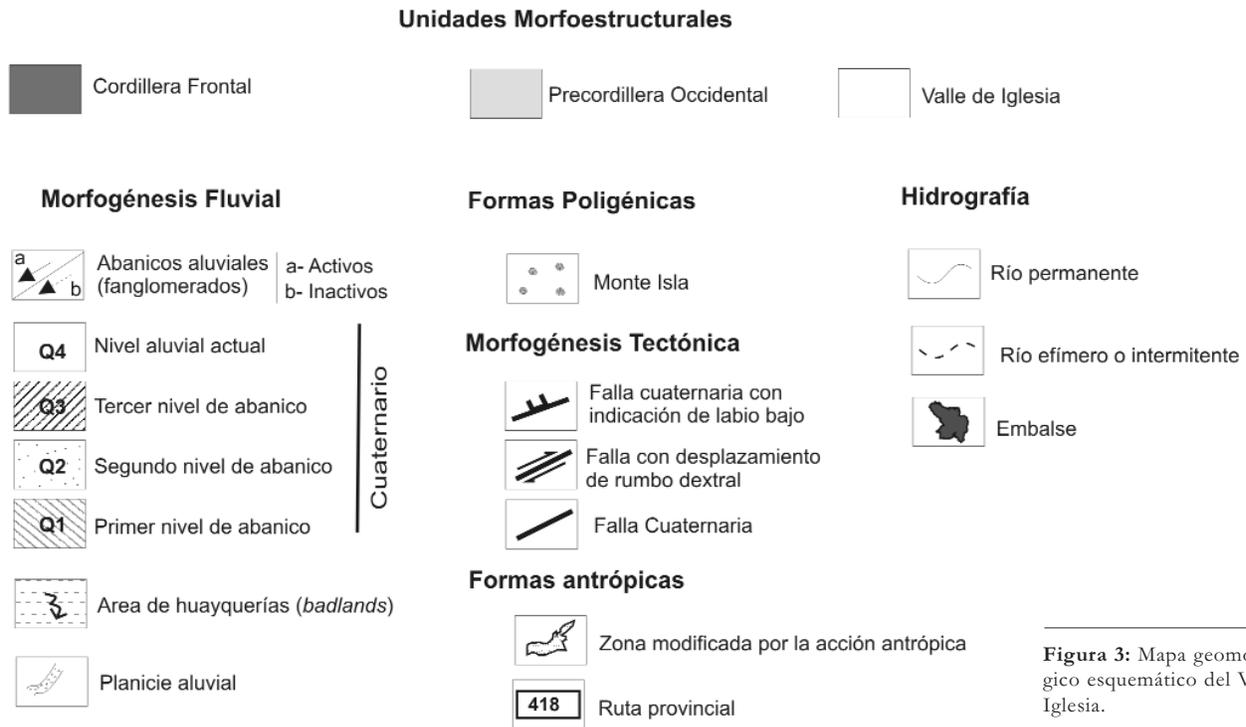


Figura 3: Mapa geomorfológico esquemático del Valle de Iglesia.

Juan el piedemonte occidental de la Precordillera Occidental. Las evidencias geomorfológicas de fallamiento cuater-

nario son muy notorias a lo largo de decenas de kilómetros, con cauces fluviales y abanicos aluviales desplazados, trinche-

ras, barreales de falla, escarpas, vertientes y vegetación alineadas. Las escarpas de falla poseen la cara libre al este, cuyas al-

turas varían entre 0,80 y 50 m y su trazo es marcadamente rectilíneo, con rumbo N10°E. Bastias (1986) estimó un desplazamiento horizontal de unos 260 m, entre 1 y 3 mm/año y Siame *et al.* (1997) determinaron un desplazamiento horizontal dextral de aproximadamente 1 mm/año a partir de la datación de los distintos niveles de abanicos afectados por la falla. Esta falla posee un trazado discontinuo, con tramos de 1 a 7 km de longitud, afectando en superficie a rocas del Neógeno y Cuaternario. Los tramos de falla se disponen en saltos en escalón hacia el oeste o sugieren un diseño en cola de caballo hacia el norte y oeste.

En el piedemonte oriental de Cordillera Frontal se desarrollan fallas subparalelas con actividad tectónica durante el Cuaternario cuyas longitudes alcanzan decenas de kilómetros y afectarían principalmente depósitos de edad pleistocena. Los principales segmentos de falla con actividad durante el Cuaternario (Fig. 2), se encuentran distribuidos a lo largo de la porción media y distal del piedemonte cordillerano, tales como las fallas Colangüil-Guañizuil, falla Pismanta-Las Flores-Bella Vista y falla Angualasto, todas con un rumbo aproximadamente norte-sur. Existen fallas con rumbo noroeste-sureste y noreste-suroeste, pero subordinadas a las anteriores. En general se trata de fallas inversas, que inclinan en algunos sectores al este y en otros al oeste con ángulos superficiales elevados, tal como se observa al norte de Guañizuil, donde depósitos aluviales pleistocenos sobreyacen sedimentitas lacustres de posible edad pleistocena superior-holocena. Los niveles lacustres a palustres son de muy reducidas dimensiones y poseen tonos amarillentos a rosados, en donde alternan niveles arenosos en los bancos inferiores de la secuencia, a limo arcilloso en los niveles superiores, alcanzando un espesor de 4,5 m (Fig. 6a).

Estos depósitos se encuentran en contacto por falla con depósitos aluviales del Pleistoceno (Nivel Q1), formados por clastos de grauvacas, volcanitas y granitos subredondeados con tamaños variables,

predominando los de 10 cm de diámetro mayor y fragmentos sobredimensionados de hasta 0,50 m. Se trata de una falla inversa, subvertical, que inclina 82° al E y posee una zona de brecha con niveles arcillosos triturados en la parte inferior y guías de yeso en la parte superior, el azimut de la falla es 30°.

La rectilinearidad del trazo de la falla, el cambio en la posición de la escarpa y en la inclinación del plano de falla, en algunos casos hacia el este y en otros al oeste, serían indicadores de desplazamiento lateral. También se han reconocido en la región de Tudcum, numerosas fallas normales subverticales, en general inclinando al este, que afectan sedimentitas de la Formación Las Flores y depósitos del Pleistoceno.

Pérez y Costa (2006) señalaron que las escarpas de los distintos tramos de falla aparecen distribuidas y discontinuas, con un patrón general en "V", cuyo vértice se ubica en el cerro Negro de Iglesia dividiéndose en dos ramales principales groseramente definidos con orientaciones nornoreste y nornoroeste.

La actividad neotectónica en una región condiciona el desarrollo de niveles de glaciares o abanicos aluviales, ya que los primeros se originan y crecen en áreas con estabilidad tectónica, mientras que son escasos en áreas con importante actividad tectónica reciente o actual, en donde predominan los abanicos aluviales (Bull 1977).

## GEOMORFOLOGÍA

El valle longitudinal de Iglesia es una depresión tectónica regional (Heredía *et al.* 2002) limitada al oeste por Cordillera Frontal y al este por Precordillera Occidental. La unidad montañosa occidental está integrada por cordones elevados con alturas que superan los 5.000 m s.n.m y la unidad montañosa oriental por sierras con alturas de alrededor a los 4.000 m s.n.m. (Cardó *et al.* 2001) (Fig. 1). El relleno del valle constituido por sedimentitas del Neógeno, corresponde a materiales depositados en una cuenca de

similar morfología al valle actual. Las mismas se apoyan sobre un paleorrelieve compuesto por rocas del Paleozoico (Contreras *et al.* 1990) y subyacen en discordancia angular a depósitos no consolidados a levemente consolidados asignados al Pleistoceno-Holoceno, correspondientes a extensos abanicos aluviales provenientes del frente oriental de Cordillera Frontal, con longitudes del orden de los 33 a 38 km. La formación de este amplio piedemonte ha controlado la extensión longitudinal del piedemonte occidental de la Precordillera Occidental constituido también por abanicos aluviales escalonados, cuyas longitudes varían entre 13 y 6 km (Fig. 3).

La génesis del paisaje resultante, a escala regional, se relaciona a procesos degradacionales y agradacionales, vinculados principalmente a la acción glacial, periglacial, fluvial y eólica. Además influyeron la actividad neotectónica y los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario.

El frente montañoso de la Cordillera Frontal es sinuoso, correspondiendo los engolfamientos con la salida de los cursos fluviales al piedemonte. Esto, junto a los procesos de glaciplanación indicaría periodos de estabilidad tectónica. Sin embargo, existen al menos tres niveles de piedemonte afectados por fallas con actividad tectónica durante el Cuaternario. Los efectos de la neotectónica que han producido resaltos topográficos, están en la mayoría de los casos acompañados por la surgencia de aguas, algunas de tipo termal.

Los cursos fluviales principales de Cordillera Frontal que evacuaron los detritos desde las áreas de aporte, presentan orientación nornoroeste-sureste, siendo los de mayor orden los arroyos Colangüil y de Agua Negra. Estos ríos, de régimen permanente, inciden notablemente los cordones montañosos cordilleranos, formando profundas quebradas, que en algunos casos poseen más de 800 m de profundidad. Los arroyos de orden menor que drenan desde la Precordillera Occidental en sentido sureste-noroeste, transportaron los materiales detríticos



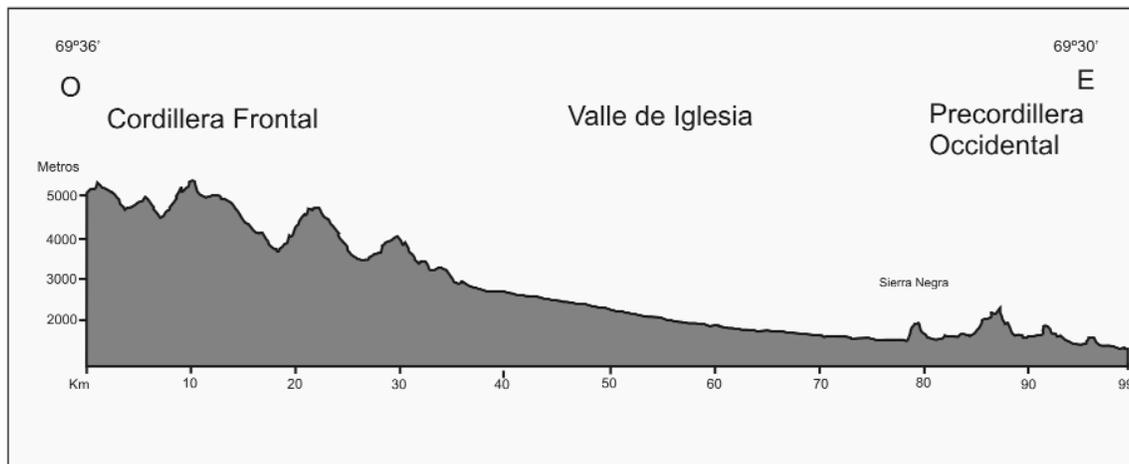
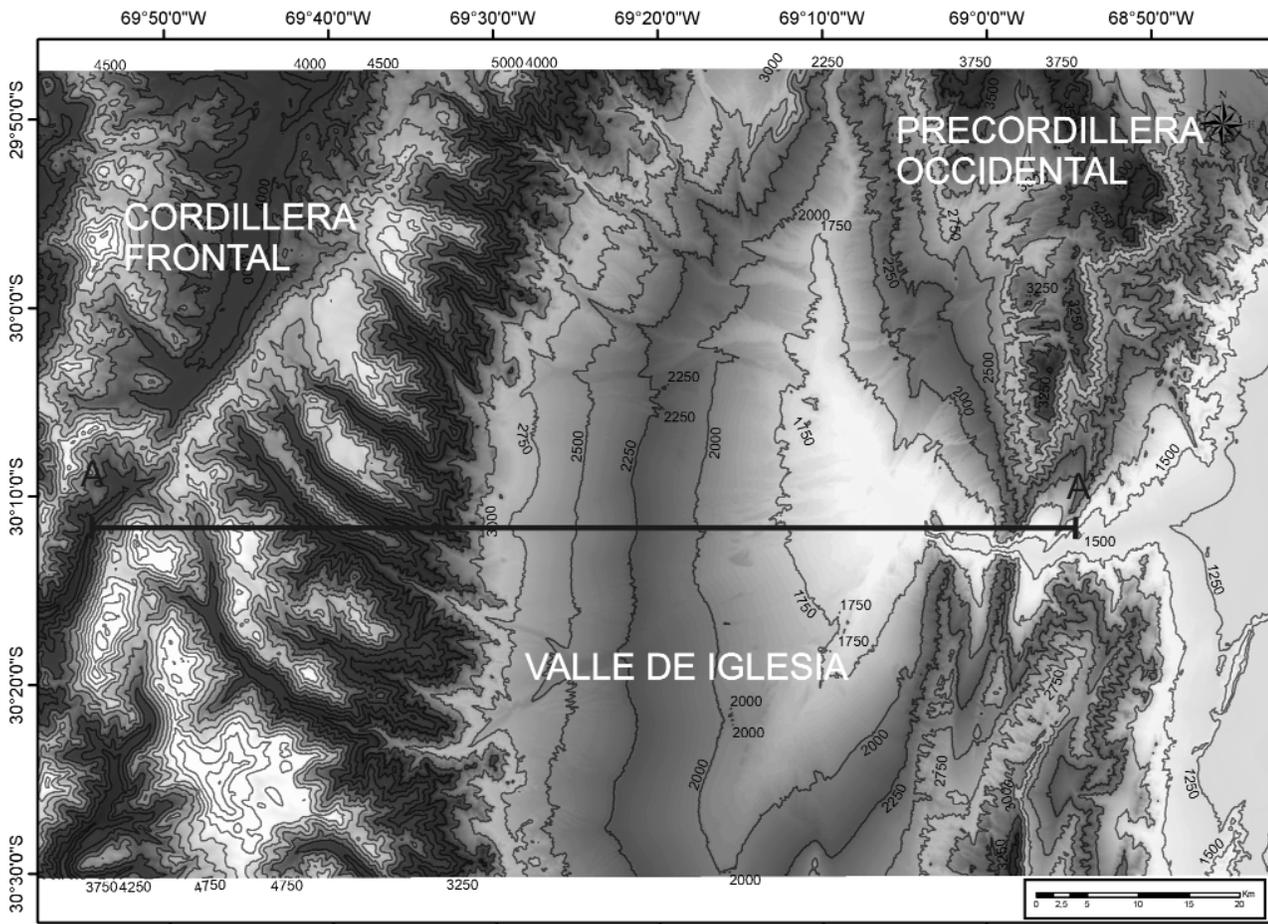


Figura 4: . Mapa topográfico del valle de Iglesia y perfil longitudinal oeste-este.

riguo y 40.000 años AP para los más recientes (Cuadro 1). Consideraron que la topografía escalonada de estos niveles se debe a variaciones en la carga y descarga de las corrientes fluviales y /o al descenso del nivel de base vinculado a un levantamiento tectónico regional y cambios hi-

drológicos por variaciones climáticas (Schumm *et al.* 1987, Ritter *et al.* 1993). Polanski (1963) describió en la depresión de Tunuyán de la provincia de Mendoza, niveles aluviales fanglomerádicos provenientes de Cordillera Frontal y que sobreyacen a superficies labradas a expen-

sas de sedimentitas neógenas. Estos depósitos aluviales conforman las Formaciones Los Mesones (Pleistoceno inferior), La Invernada (principios del Pleistoceno superior) y Las Tunas (Pleistoceno superior). Esta última unidad constituye la superficie tope de la bajada y

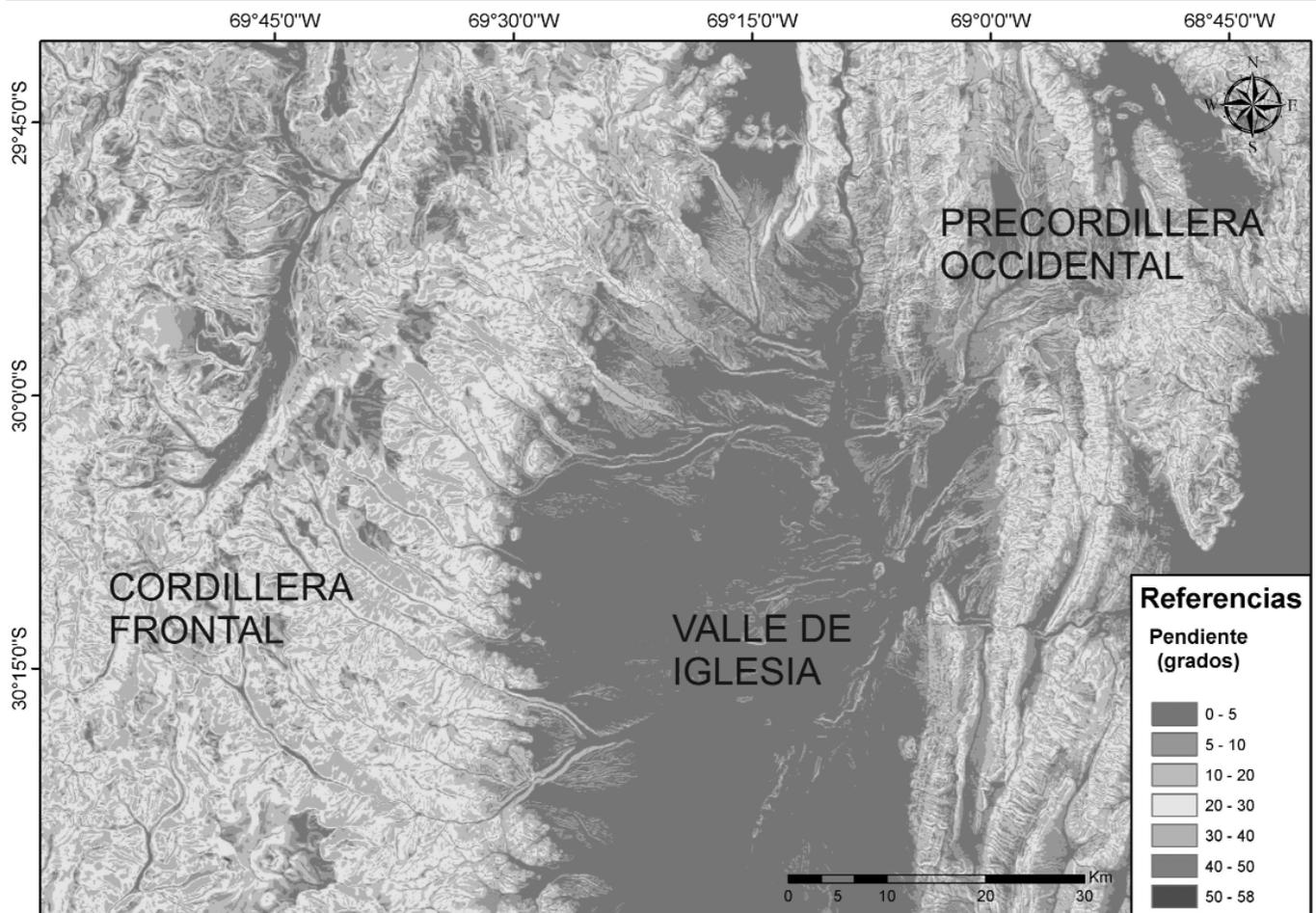


Figura 5: Mapa de pendientes.

desaparece debajo de los sedimentos de la planicie loésica, Formaciones La Estacada y Zampal, del Pleistoceno superior-Holoceno (Zárate y Mehl 2008). Polanski (1963) relacionó los cuatro ciclos de agradación (I, II, III y IV) con las fases neotectónicas Principal, Póstuma, Final y de Leve ascenso respectivamente (Cuadro 1).

Martos (1995, 2008) relacionó el escalonamiento de niveles cuaternarios en el piedemonte oriental de Precordillera Oriental con los principales pulsos neotectónicos, prevaleciendo durante la amortiguación del tectonismo, la morfogénesis climática (Cuadro 1).

En el valle de Iglesia, fallas inversas con rumbo submeridional afectan a las partes media e inferior de los niveles aluviales, generando escarpas con cara libre que cambia alternativamente al este y oeste. Los efectos de la neotectónica que han

generado resaltos topográficos, están en la mayoría de los casos acompañados por surgencia de aguas, algunas termales y otras de aguas templadas a frías.

En el interior del valle se distingue la subunidad lomadas pedemontanas que conforma un relieve de menor jerarquía (Figs. 1 y 2). Se elevan en la parte central y oriental del valle y son el producto de la erosión de diferentes niveles aluviales antiguos, ascendidos por la actividad tectónica pleistocena, cuya cubierta aluvial fuera total a parcialmente eliminada (Fig. 6a). En las lomadas donde afloran exclusivamente sedimentitas del Neógeno se destaca un relieve de tipo *bad-lands*, el cual se vincularía a condiciones climáticas semiáridas pasadas, mientras que en la actualidad el clima en el valle de Iglesia es de características áridas con precipitaciones medias anuales que varían de este a oeste de 39 a 81 mm/año (Minetti 1986).

En el piedemonte occidental de la sierra Negra, se ubican cavernas de disolución de considerable tamaño, algunas verticales o pipas profundas desarrolladas en las sedimentitas neógenas. Otros fenómenos cársticos reconocidos en el área son las estalactitas, estalagmitas, sumideros, etc. En la zona pedemontana central se reconocieron al menos dos niveles correspondientes a depósitos lacustres ubicados a diferentes cotas, los cuales se encuentran en estudio para futuras contribuciones.

## DISCUSIÓN

El paisaje del valle de Iglesia es producto de variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario, que si bien no habrían sido muy contrastantes, fueron significativas, tal como lo indica la modelación del relieve (Perucca y Martos 2008).

Se considera que alternaron condiciones más frías y húmedas en las áreas montañosas y condiciones semiáridas y periglaciares en los piedemontes, con épocas algo más cálidas y secas, similares a la actual, donde prevaleció la erosión vertical de los arroyos, dando origen a un paisaje de niveles escalonados.

La presencia de fallas con actividad cuaternaria indica además un fuerte control estructural en la evolución del paisaje durante el Pleistoceno-Holoceno, que habría favorecido el fin de un ciclo de erosión-acumulación, con importantes procesos regionales de erosión vertical y el comienzo de otro ciclo que dio origen a un nuevo nivel aluvial pedemontano, topográficamente ubicado por debajo del anterior.

En este trabajo se postula que la generación de amplios abanicos aluviales, durante el Pleistoceno, se relaciona a condiciones climáticas más frías y húmedas que las actuales, con importante generación de detritos en el área montañosa, a través de procesos de deslizamientos, avalanchas, fenómenos crioclasticos y evacuación de los mismos desde Cordillera Frontal, donde imperaban condiciones climáticas de características glaciares y periglaciares, hacia la depresión intermontana, donde el clima habría sido semiárido.

Las mayores precipitaciones níveas y pluviales registradas durante el Pleistoceno, junto al agua de fusión de los glaciares, posibilitaron la evacuación de los detritos, generando cubiertas aluviales cuyos espesores aumentan de oeste a este.

El clima actual en el valle de Iglesia es árido a hiperárido, con precipitaciones inferiores a 50 mm anuales. En estas condiciones climáticas predominan los procesos erosivos vinculados a los principales arroyos permanentes provenientes de Cordillera Frontal y también a arroyos secos que transportan crecientes instantáneas vinculadas a precipitaciones de gran intensidad y corta duración. Los mismos escurren encajonados entre relictos de abanicos aluviales cuaternarios de diferentes generaciones.

Los ríos y arroyos inciden en las áreas proximales-medias, tendiendo las aguas a escurrir radialmente en el sector distal de la bajada pedemontana oriental. Sin embargo, se ha observado en los sectores medio-distales arroyos secos que inciden profundizando sus cauces, quizás vinculado al descenso del nivel de base, que a escala regional se relacionaría con el control ejercido por el basculamiento del valle hacia el este.

También las fallas inversas que afectan a este sector favorecen la erosión retrocedente que se genera en los bloques ascendidos, la misma progresa hacia el frente montañoso hasta capturar un curso de orden mayor. De esta manera se da origen a la génesis de abanicos aluviales telescopicos (Bowman 1978), tal cual se observa tanto en el piedemonte oriental de Cordillera Frontal como en el piedemonte occidental de la Precordillera.

La diferente posición topográfica (relación estratigráfica) y la morfología de las superficies toques de los abanicos aluviales en cuanto a grado de desarrollo de pavimento y barniz del desierto, la presencia o no de caliche, el porcentaje de fragmentos afectados por crioclastismo, el mayor o menor grado de glaciplanización de las superficies, sumado al grado de disección de las laderas de las geoformas, permite dividir la serie de abanicos aluviales escalonados en tres niveles de acumulación, Q1, Q2 y Q3, más la superficie actual de acumulación-erosión, Q4, donde Q1 es el nivel aluvial cuaternario más antiguo y Q4 el más joven.

Los abanicos aluviales glaciplanizados Q1, Q2 y Q3, presentan detritos de laderas, indicando condiciones pasadas de semiaridez (Fig. 6b).

En el área cercana a Tudcum se han observado dunas enanas (*nebkas*) y mantos de arenas remontantes en las laderas de antiguos abanicos aluviales, vinculadas a las actuales condiciones climáticas donde prevalece el accionar de los vientos (Fig. 6c). La acción de la escorrentía superficial se ve paralizada bajo las condiciones climáticas actuales.

Las grietas de desecación observadas en

lechos secos actuales (nivel Q4), muestran importantes evidencias de deflación eólica, indicando un tiempo considerable sin escorrentía superficial, ni precipitaciones pluviales que las modifiquen, incluso los lados de los polígonos se encuentran muy redondeados por efecto de la deflación, que a su vez ensancha las grietas (Fig. 6d).

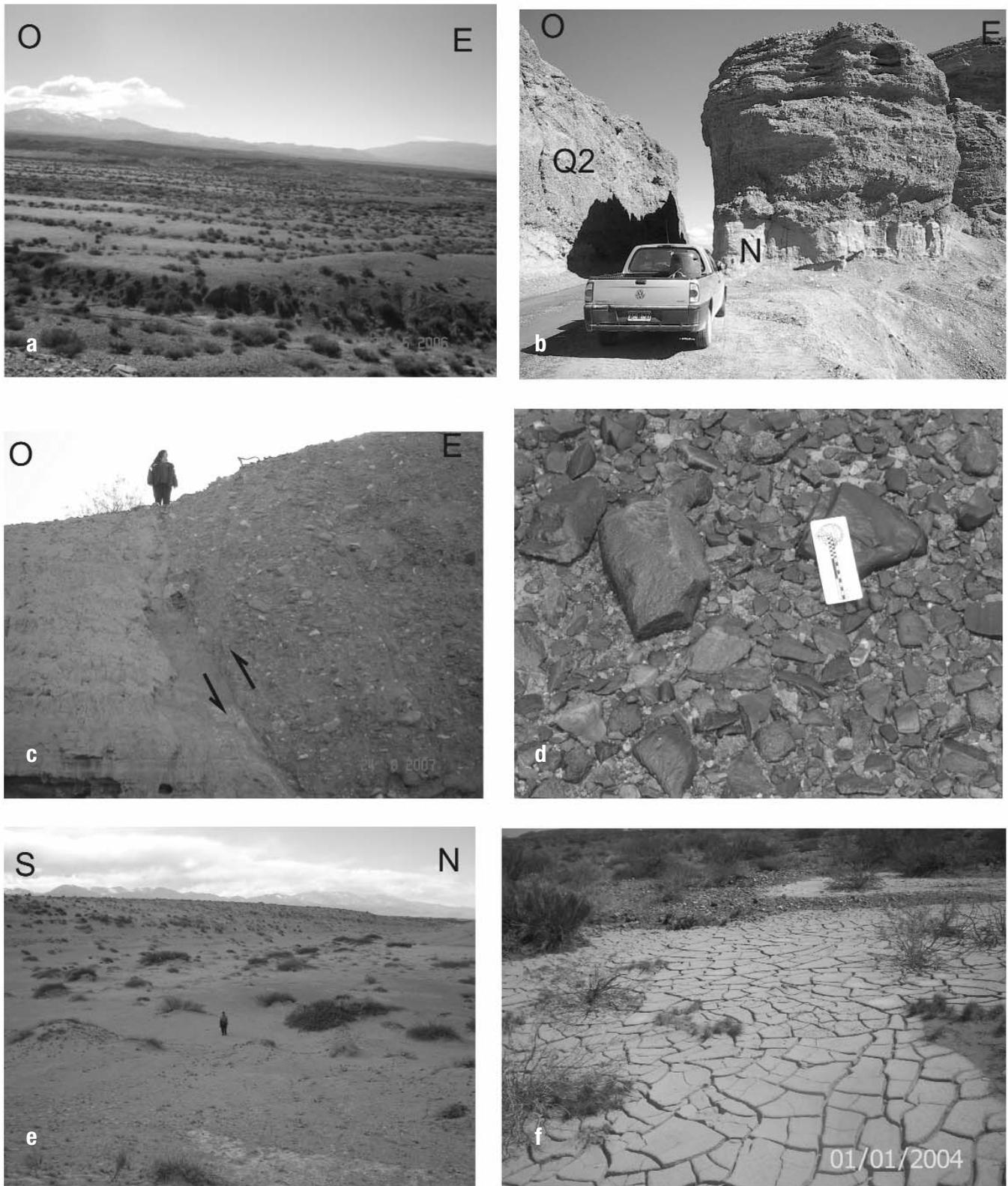
Otra evidencia de la aridificación del clima en tiempos recientes, corresponden a comentarios de lugareños, que manifiestan la notable disminución en los caudales de las aguas de las vertientes.

Gutiérrez Elorza (2001), estimó que en áreas hiperáridas, la falta de agua detiene la erosión hídrica, y si se encuentran superficies de glaciplanación responden a periodos pluviales anteriores.

En los desiertos de montaña y depresiones, de zonas elevadas, Mabbutt (1977) señaló que las condiciones varían considerablemente, y que el aporte de agua por precipitación pluvial, fusión nival o glacial es importante. En estos casos el piedemonte recibe importante carga de materiales y aporte de agua, por alimentación alóctona. Es conveniente considerar, como fuente de aporte de agua en las zonas de características climáticas áridas a semiáridas, a las precipitaciones de granizo, que rápidamente se funde generando crecientes instantáneas, de mayor poder erosivo y de transporte que las mismas precipitaciones pluviales.

Las paleoformas Q1, Q2 y Q3 corresponden a abanicos aluviales generados bajo estas condiciones climáticas. Incluso teniendo en cuenta la elevación topográfica de las sierras de Precordillera Occidental (3500 m s.n.m.), se puede inferir el establecimiento de pisos climáticos de características periglaciales y/o nivales, durante el Cuaternario, que favorecieron la generación de procesos de meteorización y remoción en masa y la posterior evacuación de los detritos de las áreas elevadas, que dieron origen a su restringido piedemonte occidental.

Si bien los cambios climáticos no habrían sido lo suficientemente contrastantes, se considera una alternancia de épocas cli-



**Figura 6:** a) Falla inversa ubicada al norte de Guañizuil, con inclinación al este que sobrepone depósitos fanglomerádicos sobre sedimentitas lacustres de edad cuaternaria; b) Vista al noroeste mostrando el nivel de abanico Q2, afectados por la neotectónica, con escarpa a contrapendiente; c) Dunas enanas y mantos de arenas remontantes; d) Grietas de desecación en sedimentos arcillosos al sur de Las Flores; e) Zona media a distal del nivel Q2, con depósitos vinculados a inundación en manto y a flujos canalizados; f) Pavimento y barniz del desierto en el nivel Q2.

máticas más frías y húmedas, con etapas menos frías y más áridas durante el Cuaternario, responsables de la modelación del relieve, con la importante participación de los eventos neotectónicos que imprimieron su influencia en la evolución del paisaje.

Las cubiertas aluviales de Q1, Q2 y Q3 sobreyacen a rampas de erosión labradas a expensas de rocas deleznable del Neógeno, la génesis de las mismas se vincularía a estabilidad tectónica que favoreció su extenso desarrollo, bajo condiciones climáticas semiáridas, es decir algo más húmedas que el clima actual.

Los materiales detríticos evacuados de las áreas montañosas generaron glaciplanación en las zonas proximales y medias del piedemonte, acumulando los materiales en las zonas distales. Por aumento de los volúmenes de detritos aportados desde las zonas montañosas sometidas a condiciones climáticas frías y húmedas, la acumulación se produjo cada vez más cerca del frente montañoso. De esta manera se genera el primer abanico aluvial reconocido en el área, Q1, a partir de flujos fluviales intermitentes, con frecuentes flujos de detritos (*debris flow*) vinculados a precipitaciones de alta densidad, deshielos rápidos o precipitaciones pluviales sobre mantos de nieve en las áreas montañosas, capaces de generar escorrentías casi instantáneas y de elevada velocidad. Este tipo de flujos se vincula a cuencas de pendientes elevadas, donde el material detrítico transportado se formaba principalmente por meteorización física en montañas frías por efecto del crioclastismo, por remoción en masa, a lo cual se sumaría el factor tectónico que generaba topografías adecuadas, aumentando los desniveles. Por otra parte, los eventos sísmicos también favorecen el desprendimiento de materiales detríticos (deslizamientos y avalanchas) en pendientes de diferentes angularidad.

Cuando el levantamiento montañoso y la agradación son mayores que la incisión del canal, aumenta su pendiente y la sedimentación se produce cada vez más cerca del frente montañoso (Bull 1968). Al

disminuir paulatinamente las diferencias de relieve creados por causas tectónicas, predominaban los procesos fluviales, del tipo de inundación en manto y flujos canalizados.

En las diferentes generaciones de abanicos aluviales cuaternarios del valle de Iglesia se destacan depósitos de flujos de detritos en las áreas próximas a los sectores apicales, mientras que en las zonas medias a distales predominan los depósitos vinculados a inundación en manto y de manera subordinada a flujos canalizados (Fig. 6e). También es de destacar la presencia de secuencias de depósitos finos, limos y arcillas, con intercalaciones de lentejones de areniscas, los cuales se habrían depositado en planicies de inundación distales, y/o en ambiente de barreral, en el cual los niveles arenosos corresponderían a depósitos de relleno de canal o de flujos efímeros, vinculados a precipitaciones intensas de corta duración.

Estas secuencias se encuentran ocupando distintas posiciones topográficas, indicando su vinculación a los diferentes procesos de acumulación Q1, Q2 y Q3, y que en parte podrían corresponder a eventos lacustres, suelen presentarse fuertemente cementados por carbonato de calcio, indicando procesos pedogénicos, vinculados a estabilidad tectónica.

La morfogénesis del abanico aluvial, Q1, asignado tentativamente al Pleistoceno medio habría finalizado por procesos tectónicos que favorecieron la incisión definitiva del mismo, dejándolo expuesto a la erosión vertical y posteriormente a la erosión lateral que disminuyó progresivamente su distribución areal, presentado en la actualidad características relictuales (Fig. 2)

La superficie tope de este abanico aluvial, comienza a evolucionar, tras reestablecerse la estabilidad tectónica en la región, a través de procesos de glaciplanación, bajo condiciones climáticas semiáridas, algo más húmedas que el clima actual.

En la superficie tope glaciplanizada se observa: pavimento del desierto originado por deflación de los finos, clastos facetados o ventifectos por abrasión eólica,

barniz del desierto y clastos fracturados por crioclastismo (Fig. 6f).

Los procesos morfogenéticos se repitieron en los tiempos pleistocénicos, con influencia de los cambios climáticos donde alternaron climas más húmedos y fríos, en las áreas montañosas y semiáridos en el valle, con climas algo más cálidos y secos, áridos a hiperáridos, sumados a la actividad tectónica puesta de manifiesto por las fallas que afectan la región. De esta manera se generaron los abanicos aluviales Q2 y Q3.

En la actualidad la evolución del paisaje es muy lenta o está prácticamente paralizada y el nivel pedemontano Q4 corresponde principalmente a relleno de cauces, muy limitado y esporádico. Los vientos predominantes en la región, se han convertido en el principal agente morfogenético, modelador del relieve del valle de Iglesia.

## CONCLUSIONES

La generación de extensos abanicos aluviales provenientes de Cordillera Frontal, se considera vinculada al establecimiento de pisos climáticos glaciares y periglaciares, que favorecieron el aporte de importantes volúmenes de detritos originados por procesos de meteorización y remoción en masa y de abundantes volúmenes de agua producto de la fusión de hielo, nieve y/o de abundantes precipitaciones pluviales que fueron movilizados hasta las zonas deprimidas, depositándose con pendientes inferiores a los 10°, dando origen a un piedemonte constituido por diferentes generaciones de abanicos aluviales escalonados. El clima en las áreas montañosas, en diferentes épocas del Pleistoceno, fue lo suficientemente frío y húmedo para sostener dichos pisos, mientras que en la cuenca de sedimentación, valle de Iglesia, el clima fue de características semiáridas.

En las sierras de Precordillera Occidental, con menores alturas topográficas, las características climáticas no habrían sido tan rigurosas, pero adecuadas para sostener pisos periglaciares y/o nivales. Se con-

sidera que estas épocas coincidieron con los períodos de mayor enfriamiento del Planeta.

La presencia de fallas de probada actividad cuaternaria, permite considerar que el tectonismo ejerció una importante intervención en el desarrollo del paisaje y generación de los distintos niveles aluviales, junto a las variaciones climáticas.

La mayor extensión del piedemonte oriental de Cordillera Frontal, controló la extensión longitudinal del piedemonte occidental de Precordillera, debido a la mayor dimensión areal de sus cuencas hidrográficas, y a procesos tectónicos que favorecieron el basculamiento de la cuenca de Iglesia hacia el este, provocando la acumulación distal de los materiales detríticos cuaternarios procedentes del oeste. De esta manera se generaron diferentes niveles de abanicos aluviales, cuyos depósitos presentan forma de cuña, con disminución del espesor hacia el oeste.

La formación de piedemontes, constituidos por abanicos aluviales escalonados o telescópicos, se considera vinculada tanto a causas tectónicas como a variaciones climáticas, siendo difícil ponderar sus mayores o menores intervenciones en la modelación del Paisaje.

Sin embargo, si se considera que durante las épocas de mayor calentamiento global, prevalecieron condiciones climáticas similares a las actuales, con una paralización de los procesos morfogenéticos vinculados a las corrientes superficiales de agua, y un principal accionar del viento, bajo condiciones de extrema aridez, se podría inferir un control estructural en el inicio de los procesos erosivos verticales. Estos eventos regionales de erosión vertical dieron por finalizado los procesos de acumulación aluvial, convirtiendo en relictos, menor o mayormente aislados, al primer nivel de abanico aluvial, Q1.

Al establecerse una calma tectónica, y tras la instalación generalizada de procesos de erosión lateral, comienza la glaciplanación del terreno, y favorecido a su vez por el retorno a condiciones climáticas frías y húmedas en las áreas montañosas y semiáridas en el valle, comienza

la acumulación del nivel de abanicos aluviales Q2, topográficamente por debajo de Q1. De igual manera se infiere la generación del nivel pedemontano Q3, que muestra mayor extensión axial, por su menor edad y menor exposición a los procesos de erosión lateral.

En la actualidad el establecimiento de un clima árido a hiperárido en el valle de Iglesia, ha provocado la casi paralización de los procesos morfogenéticos, siendo el accionar del viento el principal agente, junto a los escasos arroyos permanentes y las crecientes esporádicas muy separadas en el tiempo, los principales modeladores del paisaje.

#### AGRADECIMIENTOS

La presente contribución fue financiada con fondos del proyecto 43/06 y 1E/850 CS-CICITCA, así como del PIP 6267-2005 (CONICET). Se agradece a los evaluadores Dres. E. Cristallini y J. Sayago por sus valiosas sugerencias que contribuyeron al mejoramiento de este trabajo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Allmendinger, R.W., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis, C. e Isacks, B. L. 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude. *Tectonics* 9(4): 789-809.
- Alvarez-Marrón, J., Rodríguez-Fernández, R., Heredia, N., Busquets, P., Colombo, F. y Brown, D. 2006. Neogene structures overprinting Palaeozoic thrust systems in the Andean Precordillera at 30°S latitude. *Journal of the Geological Society*, 163: 949-964, London.
- Bastias, H. 1985. Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera, Tesis Doctoral de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, (inédito) 160 p., San Juan.
- Bastias J.A. y Uliarte, E. 1991. Tectoformas de transcurrencia, falla El Tigre, sector central, San Juan. 6° Congreso Geológico Chileno, Resúmenes expandidos: 506-509.
- Beer, J.A. 1990. Steady sedimentation and lithological completeness, Bermejo Basin, Argentina.

- Journal of Geology* 98: 501-517.
- Beer, J.A., Allmendinger, R.W., Figueroa, D.E. y Jordan, T.E. 1990. Seismic stratigraphy of a Neogene Piggyback Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 74(8): 1183-1202.
- Bowman, D. 1978. Determination of Intersection Points within a Telescopic Alluvial Fan Complex. *Earth Surface Processes* 3: 265-276.
- Bull, W.B. 1968. Alluvial fans. *Journal of Geologic Education* 16: 101-106
- Cardó, R., Díaz, I.N., Poma, S., Litvak, V.D., Santamaría, G., Limarino, C.O. 2001. Memoria Hoja Geológica 2969-III, Malimán. Servicio Geológico Minero Argentino, 67 p., Buenos Aires.
- Contreras, V., Damiani, O., Milana, J., Bracco A. y Barrera, M. 1990. Paleógeno y Neógeno de San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 154-185, San Juan.
- Furque, G. 1979. Descripción geológica de la Hoja 18c, Jáchal. Provincia de San Juan. Servicio Geológico Nacional, Boletín 164, 79 p., Buenos Aires.
- Gutiérrez Elorza, M., 2001. Geomorfología Climática (Ediciones Omega SA), 617 p., Barcelona.
- Heredia, N., Rodríguez Fernández, L., Gallastegui, G., Busquets, P. y Colombo F. 2002. Geological setting Argentine Frontal Cordillera in the flat-slab segment (30°00' - 31°30'). *Journal of South American Earth Sciences* 15: 79-99.
- Jordan, T. y Gardeweg, M. 1987. Tectonic evolution of the late Cenozoic Central Andes. En Ben Avraham, Z. (ed.) *Mesozoic and Cenozoic Evolution of the Pacific Margins*, Oxford University Press: 193-207, Nueva York.
- Jordan, T. E., Drake, R. E. y Naeser, C.W. 1993. Estratigrafía del Cenozoico medio en la Precordillera a la latitud del Río Jáchal, San Juan, Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 132-141, Mendoza.
- Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28° to 33° S), En Harmon, R.S. y Rapela, C.W. (eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*. Geological Society of America Special Paper, 265:

- 113-137.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R.J., Brooks, B., Vargas, R.B., Lauría, E., and Fortes, L.P.S. 2003. The Nazca-South America Euler Vector and its Rate of Change. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 125-131.
- Köppen, W. 1936. Das geographische System der Klimate, En Köppen, W. Geiger, G. y Gebr, C. (eds.) *Handbuch der climatologie*, Borntraeger: 1-44.
- Mabbutt, J.A. 1977. *Desert Landforms: An Introduction to systematic Geomorphology*, MIT Press 2, 340 p., Cambridge.
- Martos, L. 1995. Análisis morfo-estructural de la faja pedemontana oriental de las sierras de Marquesado, Chica de Zonda y Pederal, su aplicación para prevenir riesgos geológicos. Provincia de San Juan. República Argentina. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Tesis Doctoral, (inédito) 555 p., San Juan.
- Martos, L. 2008. Evolución paleogeográfica, paleoclimática y paleoambiental del piedemonte oriental y sierra de Pederal. Sector centro-austral San Juan. Argentina. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 715-716, Jujuy.
- Minetti, J. 1986. El régimen de precipitaciones de San Juan y su entorno. Centro de Investigaciones Regionales de San Juan (CIRSAJ), Informe Técnico 8: 19-22, San Juan.
- Oberlander, T. 1997. Slope and pediment systems. En Thomas, D.S. (ed.) *Arid Zone Geomorphology*. John Wiley: 135-163, Chichester.
- Pardo Casas, F. y Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South America plate since late Cretaceous times. *Tectonics* 6: 233-248.
- Pérez, I. y Costa, C. 2006. El sistema de fallamiento el Tigre entre el río Jáchal y el cerro Negro de Iglesia (provincia de San Juan). 13° Reunión de Tectónica. Abstracts: 80, San Luis.
- Perucca L. y Martos, L. 2008. Análisis preliminar de la evolución del paisaje cuaternario en el valle de Iglesia, San Juan. Argentina. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 721-722, Jujuy.
- Polanski, J. 1963. Estratigrafía, neotectónica y geomorfología del Pleistoceno pedemontano, entre los ríos Diamante y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 17(3-4): 127-349, Buenos Aires.
- Ré, G., Jordan, T. y Kelley, S. 2003. Cronología y paleogeografía del Terciario de la Cuenca Intermontana de Iglesia septentrional, Andes de San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58(1): 31-48, Buenos Aires.
- Ritter, J.B., Miller, J.R., Enzel, Y., Howes, S.D., Nadon, G., Grubb, M.D., Hoover, K.A., Olsen, T., Reneau, S.L., Sack, D., Summa, C., Taylor, I., Touyinhthiphonexay, K.C.N., Yodis, E.G., Schneider, N.P., Ritter, D.F. y Wells, S.G. 1993. Quaternary evolution of Cedar Creek alluvial fan, Montana. *Geomorphology* 8: 287-304.
- Schumm, S.A., Mosley, M.P. y Weaver, W.E. 1987. *Experimental fluvial geomorphology*: John Wiley and Sons, 413 p., New York.
- Siame, L.L., Bellier, O. y Sébrier, M. 2006. Active tectonics in the Argentine Precordillera and Western Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(4): 604-619, Buenos Aires.
- Siame, L., Sebfuer, M., Bellier, O., Bourles, D., Castano, J., Araujo, M., Yíou, F. y Raisbeck, G. 1996. Segmentation and horizontal Slip-Rate estimation of The El Tigre Fault Zone, San Juan Province (Argentina) From Spot Images Analysis. 3° Symposium International sur la Géodynamique Andine : 239-242, St. Malo.
- Siame, L.L., Bourlès, D.L., Sébrier, M., Bellier, O., Castano, J.-C., Araujo, M., Perez, M., Raisbeck, G.M. y Yíou F. 1997. Cosmogenic dating ranging from 20 to 700 ka of a series of alluvial fan surfaces affected by the El Tigre Fault, Argentina. *Geology* 25: 975-978.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallón)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences* 11(3): 211-215.
- Uyeda, S. y Kanamori, H. 1979. Back-arc opening and mode of subduction. *Journal of Geophysical Research* 84: 1049-1061.
- Wetten, C. 1975. Estudio geológico - económico de un yacimiento de diatomita y análisis de mercado. 2° Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Actas 5: 513-529, Buenos Aires.
- Zárate, M.A. y Mehl, A.E. 2008. Estratigrafía y geocronología de los depósitos del Pleistoceno tardío/Holoceno de la cuenca del arroyo La Estacada, departamentos de Tunuyán y Tupungato (Valle de Uco), Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(3): 407-416, Buenos Aires.

Recibido: 17 de enero, 2009

Aceptado: 29 de octubre, 2009