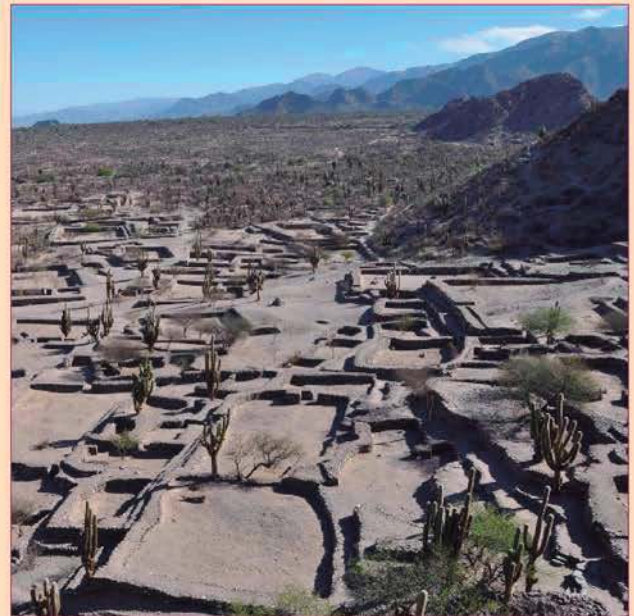


GEOARQUEOLOGÍA DE LOS VALLES CALCHAQUIES



M. M. Sampietro Vattuone y J.L. Peña Monné
(Editores)

Tucumán, 2016



Grupo de Estudios
Geoarqueológicos de América
Latina

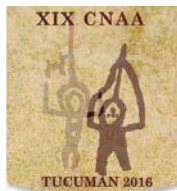


Instituto Universitario de Investigación
en Ciencias Ambientales
de Aragón
Universidad Zaragoza

ASOCIACION ARGENTINA DE
CUATERNARIO Y GEOMORFOLOGIA



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



GEOARQUEOLOGÍA DE LOS VALLES CALCHAQUÍES

Ocupaciones humanas y reconstrucciones paleoambientales del Holoceno

María Marta Sampietro Vattuone y José Luis Peña Monné
(Editores)

Primer Curso Internacional de Geoarqueología de Campo del Noroeste Argentino
First International Course on Field Geomorphology from Northwest Argentina



LABORATORIO DE GEOARQUEOLOGÍA, UNT, TUCUMÁN
UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
2016



GEOMORFOLOGÍA Y CAMBIOS AMBIENTALES EN LA DEPRESIÓN DE CAFAYATE (PROV. DE SALTA, NOROESTE ARGENTINO)

GEOMORPHOLOGY AND ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE DEPRESSION OF CAFAYATE (SALTA PROVINCE – NW ARGENTINA)

Peña Monné, José Luis^a; Sancho Marcén, Carlos^b; Sampietro Vattuone, María Marta^c; Rivelli, Felipe^d; Rhodes, Edward J.^{e,f}; Osácar Soriano, María Cinta^b; Rubio Fernández, Virginia^g; García Giménez, Rosario^h

^aDepartamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza (España) jlpenna@unizar.es;

^bDepartamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza (España); ^cCONICET y Laboratorio de Geoarqueología, UNT, Tucumán, Universidad Nacional de Tucumán (Argentina); ^dFacultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (Argentina); ^eDepartment of Earth, Planetary and Space Sciences, University of California, Los Angeles (USA); ^fQuaternary Environments and Geoarchaeology, School of Environment, Education and Development, University of Manchester (United Kingdom); ^gDepartamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid (España); ^hDepartamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid (España).

Resumen

La depresión de Cafayate es un buen ejemplo de cuenca árida pre-andina del Noroeste de Argentina. Comprende el valle del Río Santa María en su sector de confluencia con el Río Calchaquí y presenta un amplio repertorio geomorfológico (depósitos fluviales, conos aluviales, depósitos lacustres, campos de dunas) que aporta importante información sobre la evolución holocena y, de forma especial, para los últimos mil años. En esta oportunidad, se dedica mayor atención a las acumulaciones eólicas, en las que se han realizado estudios geomorfológicos, mineralógicos y una aproximación cronológica a partir de dataciones OSL y restos arqueológicos. Los datos obtenidos ponen en evidencia que las dunas de Cafayate han permanecido activas durante el último milenio, con varias dataciones que indican alta actividad durante la Anomalía Cálida Medieval (1000-1100 AD) y la Pequeña Edad del Hielo (intervalos 1300-1420 AD; 1540-1650 AD; 1740-1830 AD). La utilización de otros datos paleoambientales (climatología e hidrología histórica, arqueología) de ámbito regional permite reconstruir los cambios dinámicos en la actividad eólica en relación con los eventos ENSO cálidos y fríos, así como la posible intervención antrópica en la evolución de estos paisajes áridos.

Palabras clave: Pequeña Edad del Hielo, Anomalía Cálida Medieval, dunas, dataciones OSL, ENSO

Abstract

The depression of Cafayate is a good example of an arid pre-Andean basin from the Northwest Argentina. It includes the Santa María River valley in its confluence with the Calchaquí River valley. It has a complex and rich geomorphological repertoire (fluvial deposits, alluvial fans, lacustrine deposits, dune fields). All these landforms provide important information about the Holocene evolution of the area, especially for the last millennium. On this opportunity, the aeolian accumulations were geomorphological, mineralogical and chronological studied through OSL datings and archaeological remains. The obtained data show that the dunes of Cafayate remained active during the last millennium, with several dates of high activity during the Medieval Climatic Anomaly (1000-1100 AD) and the Little Ice Age (1300-1420 AD; 1540-1650 AD; 1740-1830 AD). The use of other regional paleoenvironmental proxies (historical and archaeological) allow to reconstruct dynamic changes in the aeolian activity related to warm and cold ENSO, as well as anthropic responses in the evolution of these arid landscapes.

Keywords: LIA, MCA, dunefield, OSL dating, ENSO

INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas ocupan una gran extensión en el Noroeste Argentino. Sin embargo, la información geomorfológica y las reconstrucciones paleoambientales del Holoceno son muy escasas para estas áreas. En la quebradas septentrionales habría que destacar los trabajos de cartografía y evolución de la quebrada de Purmamarca de May (2008) y de Sancho et al. (2008) sobre los conos aluviales de Tilcara, en la quebrada de Humahuaca. También hay numerosos trabajos sobre macrodeslizamientos y cierre de áreas lacustres en diferentes valles de los Andes y Sierras Pampeanas, incluyendo los Valles Calchaquíes (Trauth y Strecker, 1999; Bookhagen et al., 2001; Trauth et al., 2003b; Hermanns y Strecker, 1999; Hermanns et al., 2000). En el valle de Santa María, donde se enmarca nuestra zona de estudio, también hay antecedentes sobre la evolución de conos aluviales y glaciares pleistocenos en relación con contextos de ocupación humana (Sampietro Vattuone y Neder, 2011; Maldonado et al., 2014). Igualmente se han publicado también varios trabajos sobre la geomorfología y el Cuaternario del valle de Tafí (Sayago et al., 1991; Collantes y Sayago, 1987; Sayago et al., 1998; Sayago, 1999; Collantes, 2001, 2007). Más recientemente, Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (en prensa) y Peña-Monné y Sampietro-Vattuone (en prensa) han aportado un escenario evolutivo muy completo para el Holoceno del valle de Tafí y su relación con los cambios ambientales y la ocupación humana del territorio. Por último, las acumulaciones eólicas de Cafayate sólo fueron tratadas en dos trabajos sobre la mineralogía de las dunas (Cortezzi et al., 1984; Osácar et al., 2006) y recientemente en una primera versión en la que se aportan las dataciones efectuadas en el sistema dunario (Peña-Monné et al., 2015).

El objetivo principal de este trabajo es presentar el estudio geomorfológico general de la depresión de Cafayate, con especial atención a su gran campo de dunas. En primer lugar se ha elaborado un mapa geomorfológico que permite establecer la distribución y conexión espacial entre las diferentes formas de relieve. Tras la descripción geomorfológica de la depresión de Cafayate, se analizan más detalladamente las acumulaciones eólicas con la finalidad de conocer sus características geomorfológicas, mineralógicas y sedimentológicas, así como aproximarnos a su cronología. Finalmente, se efectúa una interpretación paleoambiental a partir de las dataciones obtenidas y de otras evidencias paleoambientales regionales, poniéndolos en relación con la variabilidad climática del Noroeste Argentino y con cambios generados por la acción antrópica, a través de los diferentes momentos culturales de ocupación humana.

EL ÁREA DE ESTUDIO

La depresión de Cafayate está localizada en la provincia de Salta (Argentina) y forma parte de los Valles Calchaquíes. La localidad homónima se sitúa en la parte norte, a 1683 m.s.n.m. y a una latitud de 26° 0'S, es decir en un ámbito subtropical. El Río Santa María discurre hasta su confluencia con el Río Calchaquí por el amplio valle de Santa María que sigue una depresión tectónica alargada de dirección N-S en las Sierras Pampeanas (Fig. 1). El valle está bordeado al este por las Cumbres Calchaquíes (La Hollada, 4177 m) y al oeste por la Sierra de Quilmes (Cerro Chuscho, 5468 m). Tras la confluencia de los dos ríos, el valle se va estrechando, dando inicio al cañón del Río Las Conchas que se prolonga hacia el norte formando parte de la cuenca del Río Juramento. Hasta este sector, la cuenca fluvial alcanza una extensión de 19.760 km² y su régimen se caracteriza por presentar importantes crecidas durante el verano debido a ser la temporada de lluvias y recibir aguas de fusión de nieve de las cabeceras montañosas, mientras que en invierno el cauce del Río Santa María está seco y el Calchaquí mantiene muy escaso caudal.

Desde el punto de vista geológico, la región presenta una compleja evolución (Galván, 1981). En la Sierra de Quilmes y parte noreste de las Cumbres Calchaquíes aflora el basamento granítico y metamórfico del Precámbrico-Cámbrico inferior (Rapela, 1976; Toselli et al., 1978).

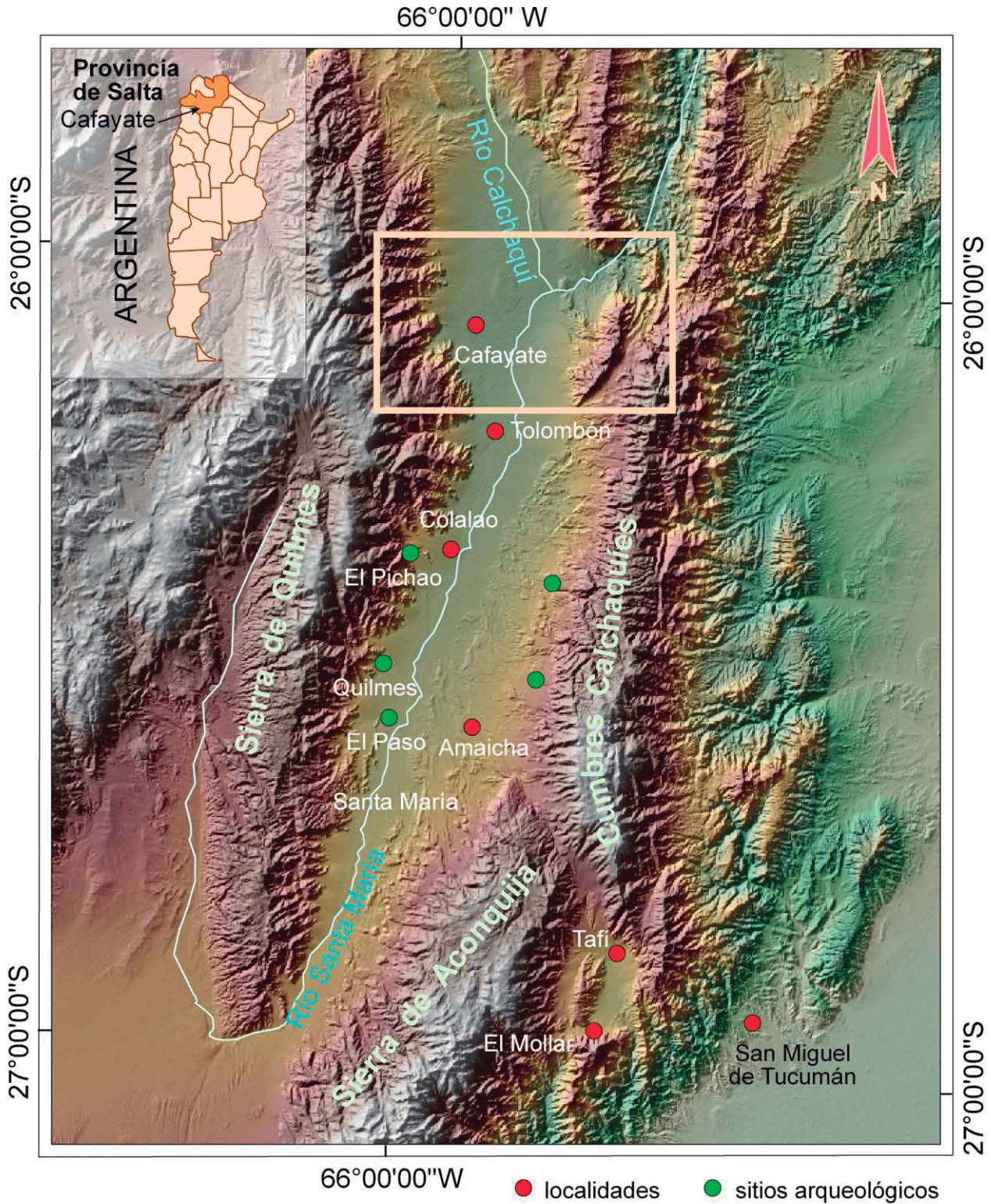


Fig. 1. Mapa de situación de la depresión de Cafayate en el valle del Río Santa María.
Fig. 1. Location map of the Cafayate depression in the Santa María River valley.

Desde el Cretácico superior y hasta el Mioceno se depositaron series sedimentarias detríticas continentales y rocas carbonatadas (Grupo Salta) en una amplia fosa (Salfity y Marquillas, 1999; Bossi et al., 2001), terminando con la superposición de los depósitos detríticos pliocenos del Grupo Santa María (Galván y Ruiz Huidobro, 1965; Galván, 1981). Una fase compresiva afectó a todo el conjunto durante el Plioceno, generándose estructuras N-S y reactivándose las fallas marginales del valle de Santa María. Los depósitos cuaternarios se extienden por el fondo de estos valles en forma de abanicos aluviales, depósitos fluviales, eólicos y lacustres.

Según la clasificación de Köppen, Cafayate tiene un clima de tipo Bwk' (árido y con invierno frío) (Minetti et al., 2005). Su temperatura media anual es 17,1°C, oscilando las medias mensuales entre los 21,5°C de Febrero y los 9,7°C de julio (Fig. 2). Por otra parte, la aridez es extrema, especialmente en invierno; las únicas lluvias se concentran en verano, alcanzando una media anual de 207 mm, coincidiendo con la estación de máxima evaporación (Fig. 2), lo que genera un alto déficit hídrico. Por ello, la vegetación se compone predominantemente de algarrobos (*Prosopis nigra*) y jarillas (*Larrea divaricata*), pertenecientes a la denominada 'coregión del Monte'. En las zonas bajas predomina la estepa arbustiva con cardones (*Trichocereus atacamensis*) (Mendoza, 2005).

Los estudios arqueológicos realizados en esta región incluyen el análisis de cultura material, trabajo de campo y arte rupestre (Lo Celso y Ledesma, 2005; Ledesma, 2004, 2005; Ledesma y Subelza, 2009). La evidencia recuperada abarca principalmente el lapso temporal representado por los períodos Formativo (ca. 500 AC-1000 AD), Desarrollos Regionales (ca. 1000-1400 AD), Inca (ca. 1400-1500 AD) e Hispanoindígena (ca. 1500-1700 AD) (Ledesma, 2011).

Después de un largo período de resistencia indígena, la ocupación española que se hace efectiva a partir de 1665 AD tras la victoria del ejército dirigido por el entonces gobernador Mercado y Villacorta. Con posterioridad, la región pasa a integrarse al sistema mercantilista impuesto por la colonia española, convirtiéndose en una zona de cría de ganado mular de exportación hacia el Alto Perú (Mata de López, 1998, 2000).

En la actualidad, la ciudad de Cafayate es el núcleo de mayor tamaño, con 15.000 habitantes. Desde los años '90 la región se ha convertido en productora de vinos de calidad para exportación, existiendo un gran número de bodegas cuyos viñedos han ido ocupando las zonas bajas del valle y el campo de dunas, utilizando los acuíferos para el riego ya que apenas hay disponibilidad de agua superficial, especialmente por la permeabilidad del fondo aluvial.

Los riesgos naturales exógenos que amenazan la zona son de variado origen. Por una parte, los ríos Santa María y Calchaquí registran anualmente crecidas importantes que afectan esencialmente las vías de comunicación; sin embargo, son las crecidas de los afluentes laterales, que fluyen por el entorno de Cafayate, como las quebradas de Yacochuya, Mishi y Loro Huasi, las que producen los mayores problemas, con esporádicos flujos de detritos (*debris flow*) y coladas de barro (*mudflow*) que afectan a campos de cultivo y áreas pobladas a pesar de las obras de contención construidas en los últimos años. Por último, las tormentas de polvo y arenas finas son muy frecuentes, permaneciendo el polvo en suspensión durante largo tiempo.

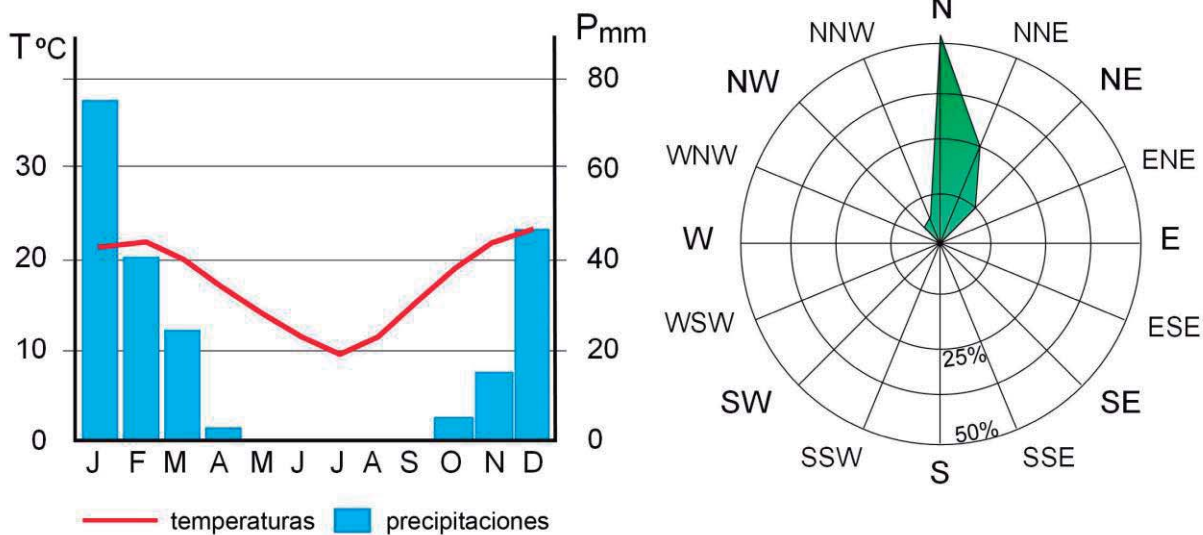


Fig. 2. Temperaturas y precipitaciones medias mensuales y rosa de vientos de Cafayate.
Fig. 2. Medium temperatures and precipitations and rosewind of Cafayate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han utilizado fotografías aéreas (Spartam Air Service (1969) a escala 1:50.000) e imágenes de Google-Earth de 2003-2013 para la elaboración del mapa geomorfológico general de la depresión de Cafayate, dedicando especial atención a las unidades morfosedimentarias cuaternarias (depósitos lacustres, conos aluviales, campos de dunas y fondos aluviales) que cubren el fondo de la cuenca. La cartografía, junto con el trabajo de campo, ha permitido delimitar las acumulaciones eólicas e identificar las unidades estabilizadas y activas.

En los primeros trabajos de campo (2003) se pudieron localizar varios perfiles originados por corredores de deflación eólica, que permitieron observar secuencias eólicas más antiguas, con mayor grado de consistencia y compactación, así como diferente coloración que las dunas activas.

Para su estudio se tomaron muestras en las dos principales acumulaciones dunares: (1) Los Médanos 1, cerca del puente sobre la Ruta Nacional 68 (muestras CTE-1 y CTE-2, coordenadas 26°02'58.22"S; 65°5'0.79"W; 155 m.s.n.m. y muestras CT -3 y CTE-4 (coordenadas 26°0'0.2"S; 65°5'11.6"W; 1555 m.s.n.m.) y (2) Los Médanos 2, cerca de la carretera entre Cafayate y Tolombón (muestras CTE-5 y CTE-6, coordenadas 26°08'25. "S; 65°57' 0.62"W; 1625 m.s.n.m.).

La distribución del tamaño del grano se obtuvo por tamizado mecánico considerando las partículas entre 2680 y 7 μm . El análisis mineralógico fue llevado a cabo mediante difracción de Rx (DRX) (difractómetro Philips PW 1729 de la Universidad de Zaragoza). La composición mineralógica semi cuantitativa fue determinada por el método del polvo de acuerdo a la literatura (Muhs, 2004; Hillier, 2003). Se seleccionaron cien granos de la fracción inferior a 63 μm para el análisis de minerales pesados realizando la separación con bromoformo (S.G.=2,9) y la identificación posterior con microscopio petrográfico. Finalmente, el estudio de morfología de granos y las texturas superficiales se realizó con granos de diámetro entre 297 y 51 μm de la fracción liviana. El microanálisis se realizó con SEM/EDX utilizando un microscopio electrónico Inspect (FEI), equipado con un analizador de Rx de energía dispersiva (fuente W, analizador DX4i y detector Si/Li) en la Universidad Autónoma de Madrid. Los análisis químicos utilizando análisis de Rx de energía dispersiva (EDX) también se llevaron a cabo en los granos seleccionados. Las muestras se dataron por luminiscencia de estimulación óptica (OSL) en el Luminescence Dating Laboratory de la Universidad Nacional de Australia. Los análisis se han realizado sobre granos de cuarzo con tamaños de 180-255 μm , usando protocolo SAR (Murray y Wintle, 2000, 2003). Los valores de dosis media gamma y beta fueron calculados utilizando Análisis de Activación Neutrónica. Se utilizó un contenido uniforme de agua de entre $5 \pm 2.5\%$ para el cálculo de edad, basado en los valores medidos. Las medidas de OSL y procedimientos analíticos fueron similares a aquellos descritos por Teeuw y Rhodes (2004) y Rhodes et al. (2003).

Se localizaron también restos de cerámica relacionados con la evolución de las dunas del sector Los Médanos 2, que fueron clasificados in situ por arqueólogos del Laboratorio de Geoarqueología, UNT, Tucumán de la Universidad Nacional de Tucumán. Por último, se han utilizado trabajos con documentación histórica y datos dendrocronológicos para apoyar la información cronológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rasgos geomorfológicos generales

Los relieves montañosos de las Cumbres Calchaquíes y de la Sierra de Quilmes que circundan la depresión se caracterizan por morfologías abruptas fuertemente incididas por la red fluvial (Fig. 3). Tanto el granito como las rocas metamórficas presentan divisorias estrechas entre las cuencas, con laderas rocosas de fuerte pendiente, en las que puntualmente puede haber formas residuales debidas a antiguos procesos de alteración, como tors y bloques redondeados, especialmente en el granito. Igualmente se observan barnices desérticos afectando a algunas superficies rocosas. Únicamente las rocas detríticas y carbonatadas mesozoicas y neógenas fuertemente replegadas del SW y NW han creado relieves estructurales en hog-backs y cuevas alargados en las direcciones estructurales (NW-SE) (Fig. 3).

Estos relieves albergan las cuencas principales de la red de arroyos (quebradas) que fluyen desde las divisorias montañosas hacia el valle del Río Santa María y, en la parte Norte, hacia el Río Calchaquí. Las cuencas alcanzan mayores dimensiones en las Cumbres Calchaquíes por lo que estos cursos presentan más área de captación de caudales y por consiguiente forman un piedemonte de conos terminales segmentados de gran extensión (Fig. 3). Los arroyos que descienden de la Sierra de Quilmes son de menor importancia, creando conos menos extensos aunque de mayor pendiente. El resultado es un valle marcadamente disimétrico, en el que dominan los depósitos procedentes del conjunto montañoso oriental. Estos conos estaban ya en funcionamiento antes del Holoceno medio, ya que en los depósitos de uno de ellos puede observarse una intercalación de cenizas volcánicas (Fig. 4a) cuya edad está establecida a nivel regional en torno a 4200 BP, correspondiendo a la erupción de Cerro Blanco (Fernández-Turiel et al., 2012, 2013; Báez et al. 2015) y definido como unidad cronológica y geomorfológica por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (en prensa).

Junto a estos conos holocenos y actualmente funcionales, en el margen oriental (Fig. 3) se conservan importantes acumulaciones de conos y glaciares pleistocenos, que conforman grandes piedemontes detríticos que corresponden a varias etapas antiguas de aluvionamiento, con morfología escalonada. Estas acumulaciones adquieren aún mayor importancia al sur de la depresión de Cafayate, donde han sido analizadas por Sampietro Vattuone y Neder (2011).

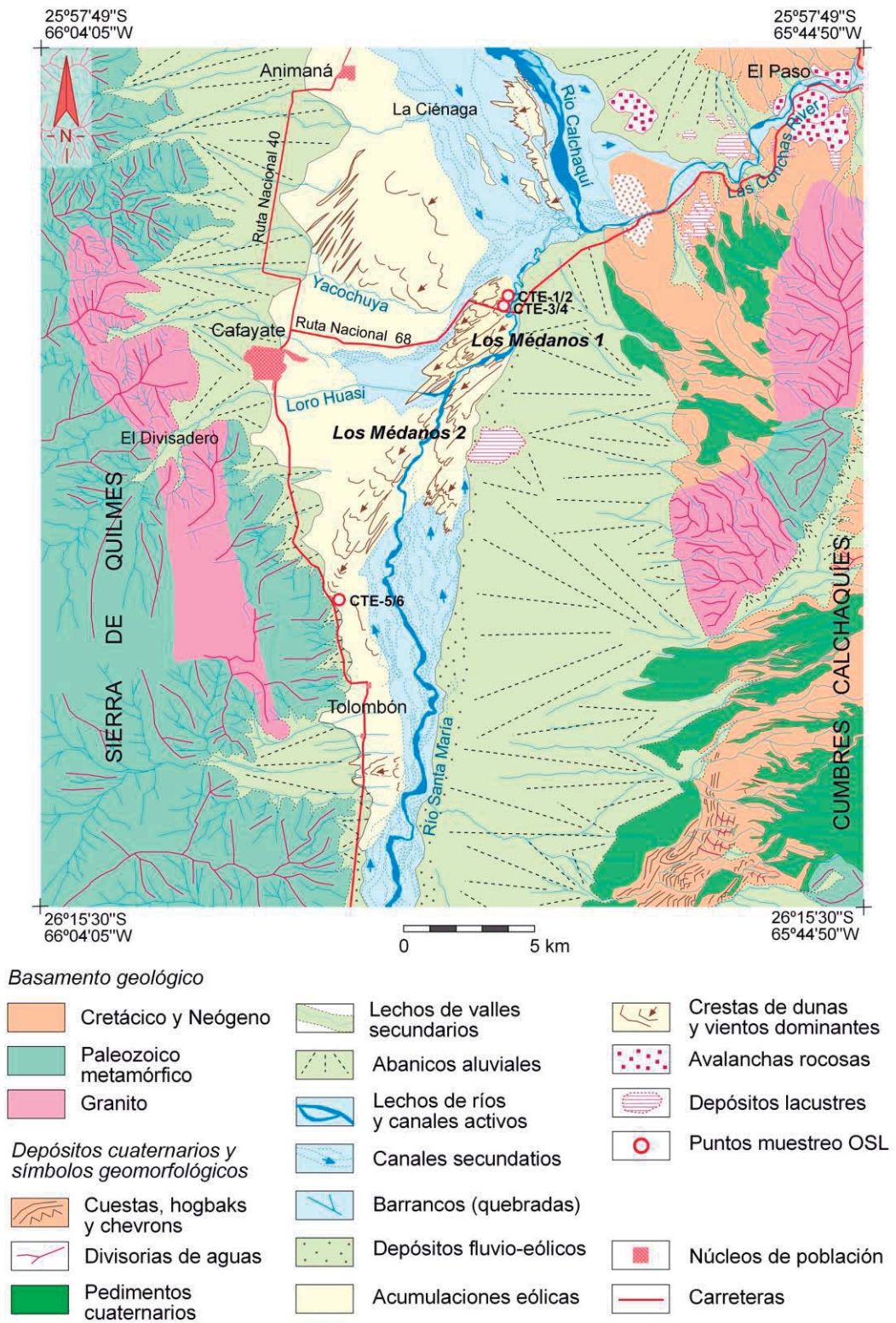


Fig. 2. Mapa geomorfológico de la depresión de Cafayate.
Fig. 2. Geomorphological map of the Cafayate depression.



Fig. 4. a) Corte de un cono aluvial de la vertiente de la Sierra de Quilmes, entre Cafayate y Tolombón, destacando la capa de cenizas volcánicas intercaladas en los sedimentos detríticos y detalle del mismo; b) Panorámica del lecho aluvial del río Santa María desde el puente de la Ruta Nacional 68, al NE de Cafayate. c) Panorámica general de los depósitos lacustres de la zona de El Paso y detalle de los mismos.

Fig. 4. a) Profile of and alluvial fan located in the east side of Sierra de Quilmes, between Cafayate and Tolombón, see the tephra layer stratified among the detritic layers, detail of the tephra layer; b) Panoramic view of the alluvial bed of Santa María River, see from the bridge over National Road 68, NE Cafayate; c) Panoramic view of the lacustrine deposits at El Paso area, detail of the deposits.

El nivel de base general de la red fluvial cuaternaria lo marcan los dos ríos principales, con amplias llanuras de inundación, especialmente al N de Tolombón y en la zona de confluencia de ambos ríos (Fig. 3). Estos cursos presentan canales múltiples tipo trenzado (braided), con barras compuestas predominantemente de arenas y arcillas (Fig. 4b). En algunos tramos (Fig. 3) el Río Santa María adquiere trazado meandriforme, con sinuosidades muy marcadas y brazos abandonados que pueden afectar a las vías de comunicación, como ocurre en el sector del puente de la Ruta Nacional 68, que une Cafayate con Salta.

Otros testimonios importantes de la evolución cuaternaria lo constituyen los depósitos lacustres, de los que quedan remanentes en varios puntos de valle, especialmente en el sector central y noreste (Figs. 3, 4c). Trauth y Strecker (1999) Bookhagen et al. (2001), Trauth et al. (2003b), Hermanns y Strecker (1999) y Hermanns et al. (2000) han estudiado estos sedimentos y los relacionan con un lago formado por el bloqueo del valle en la zona de El Paso, al inicio del valle del Río Las Conchas, a causa de deslizamientos rocosos, que dieron lugar a un paleolago que se extendió hasta cerca de Tolombón. Si bien estos deslizamientos fueron interpretados en un primer momento como generados en una fase de mayor humedad, en posteriores estudios (Trauth et al., 2003a; Hermanns et al., 2006) se han relacionado con actividad sísmica. Los restos conservados muestran sedimentos laminados de hasta 47 m de espesor, abarcando edades desde 36-28 ka AP (Trauth y Strecker, 1999) a partir de dataciones ¹⁴C de conchas de gasterópodos de agua dulce. Dataciones posteriores (Hermanns et al., 2006; Hermanns y Schellenberger, 2008) prolongan la presencia del lago hasta el Holoceno medio (10.8-4.7 ka AP), lo que es bastante improbable desde el punto de vista geomorfológico por la imposibilidad de explicar un vaciado sedimentario tan rápido y por su interferencia de fechas con la evolución de los conos antes mencionados, ya que quedan dentro del perímetro calculado para dicho lago. En cualquier caso, su apertura definitiva hacia el R o Las Conchas a través de “ El Paso” marca el inicio de la evolución reciente, en la que gran parte del sedimento lacustre fue erosionado y se generaliza el sistema de abanicos aluviales. Por otra parte, también por entonces dio comienzo la formación de los campos de dunas que se extienden por el fondo del valle y que es uno de los principales objetivos de este estudio.

Geomorfología de los campos de dunas

Uno de los componentes más importante del marco geomorfológico general de Cafayate son las acumulaciones eólicas. Se extienden por todo el fondo del valle, desde los conos aluviales de Animaná hasta el sur de Tolombón, con su máximo desarrollo en las proximidades de Cafayate, en donde se han diferenciado dos grandes campos dunares: Los Médanos 1 y Los Médanos 2

(Fig. 5). Otros campos menores aparecen en el entorno de La Ciénaga, al sur de Animaná, y en Tolombón.

Los depósitos eólicos son registros morfosedimentarios de gran utilidad para obtener reconstrucciones paleoambientales (Hesse, 2009; Iriondo et al., 2009; May, 2013; Thomas, 2013) ya que la dinámica de las dunas ha estado muy influenciada por las fluctuaciones climáticas de corta duración del Pleistoceno superior y Holoceno (Muhs, 1985; Gaylord, 1990; Forman et al., 1992; Lancaster, 1997; Munyikwa, 2005; Hanson et al., 2009). También la acción humana ha intervenido en la aceleración de los procesos eólicos en tiempos históricos (Levin y Ben-Dor, 2004; Wolfe et al., 2007). Cuando los cambios ambientales, el sobrepastoreo, o el fuego reducen la cobertura vegetal sobre las dunas hasta superar el umbral del 30%, las arenas quedan expuestas para su movilización (Pye y Tsoar, 2009).

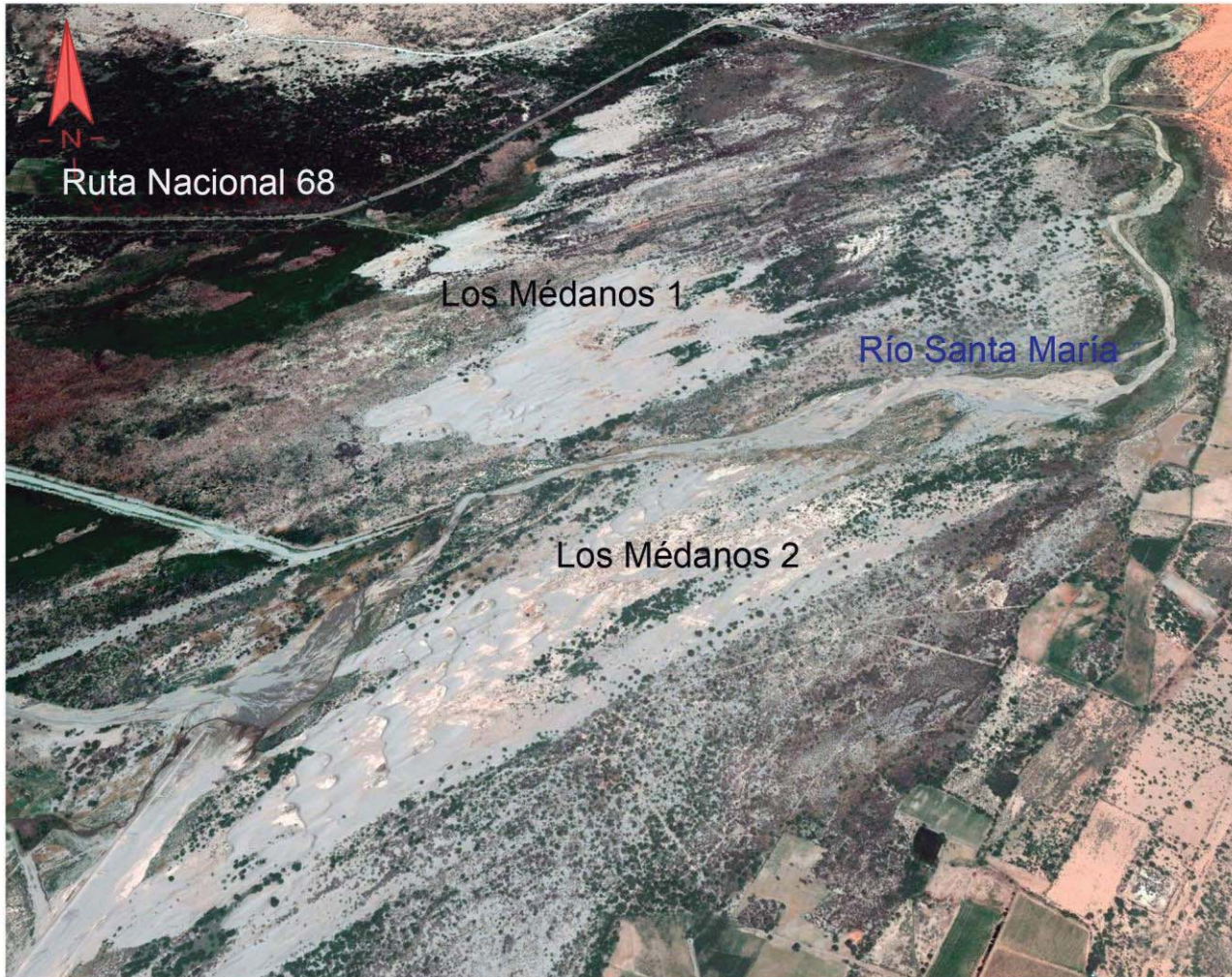


Fig. 5. Imagen de Google Earth (año 2012) de los campos de dunas de Cafayate.
Fig. 5. Google Earth image (2012) of the dunefields of Cafayate.

Las dunas de Cafayate están parcialmente fijadas por vegetación, aunque hay amplias zonas activas. Los tipos de dunas dominantes son barjanas y cordones de barjanas, así como dunas parabólicas con vegetación (Fig. 6). También son habituales las dunas lineales y las nebkhas (*hummock dunes*). Las principales alineaciones se orientan de NE a SW, excepto en el área de Tolombón, que giran a E-W. Estas direcciones son el resultado de los vientos dominantes (Fig. 2) adaptados a desviaciones al NE por el predominio de giros en torbellino y a la entrada encañonada del viento desde el cañón del Río Las Conchas, en el sector NE.

La vegetación que estabiliza parte de las dunas se compone de especies adaptadas a condiciones áridas y cálidas, como *Sporobolus rigens*, asociadas con *Atriplex sp.*, *Saueda sp.*, *Gomphrena martiana* y *Heliotropium mendocinum*, todas ellas con amplio sistema radical (Hueck, 1950) (Fig. 7). En las acumulaciones más antiguas el algarrobo (*Prosopis nigra*) es la planta dominante, que ha sido explotado de forma generalizada para madera, leña y postes de soporte de los viñedos. Desgraciadamente, la sobreexplotación ganadera, los incendios intencionales producidos en los últimos años y la extensión del viñedo han favorecido la eliminación de una parte

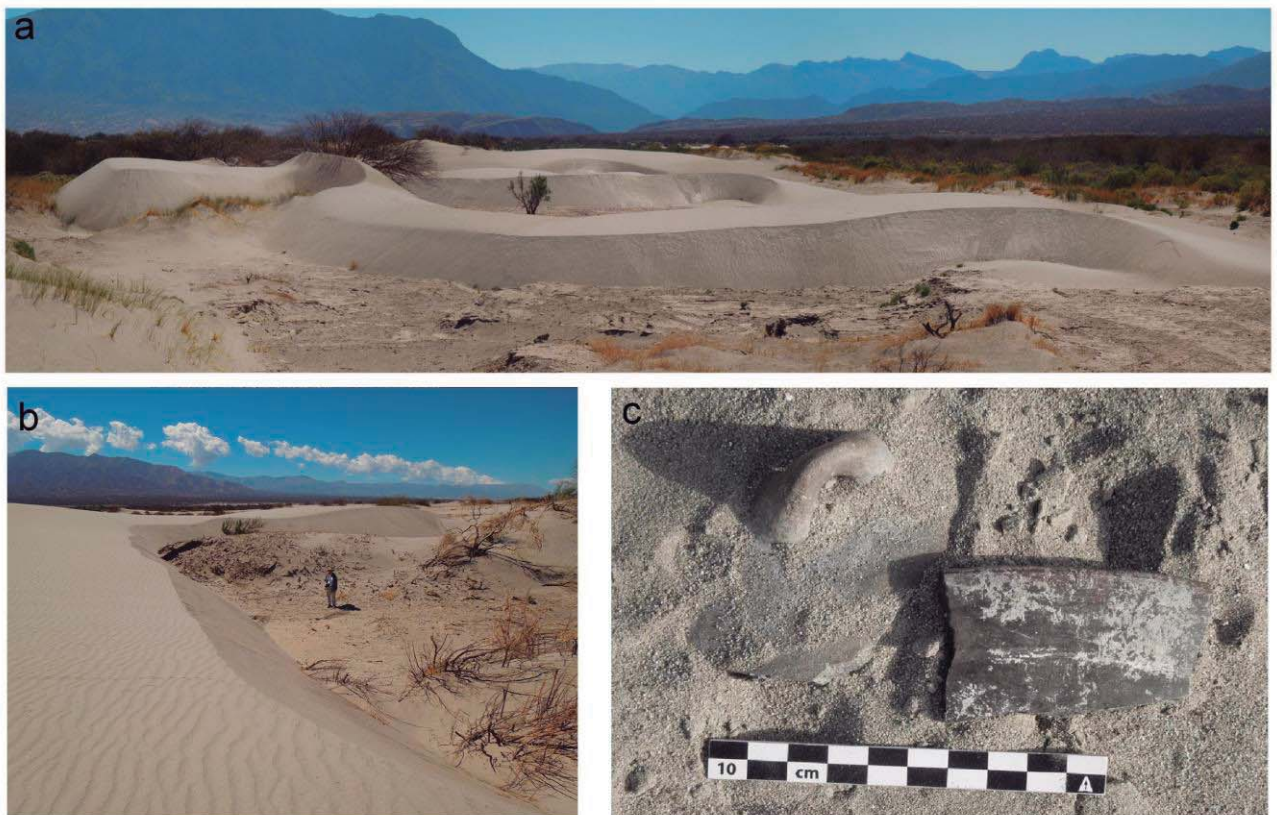


Fig. 6. a) Vista frontal de dunas barjanoides del campo de dunas de Cafayate; **b)** vista lateral; **c)** materiales arqueológicos yaciendo in situ.

Fig. 6. a) Frontal view of barjanoid dunes from the dunefield of Cafatate; **b)** lateral view; **c)** archaeological remains laying in situ.

importante de esta vegetación y en muchos casos la reactivación de los depósitos eólicos. Además de esta circunstancia antropogénica, hay otros factores favorables para la actividad de las dunas, como son la frecuencia de las tormentas convectivas y la disponibilidad de arena.

En relación a las tormentas convectivas, en la actualidad la formación de corrientes ascendentes de aire son habituales durante las tardes (Minetti et al., 2005), con formación de torbellinos de polvo y arena fina. Estas tormentas secas, en ocasiones con vientos que superan los

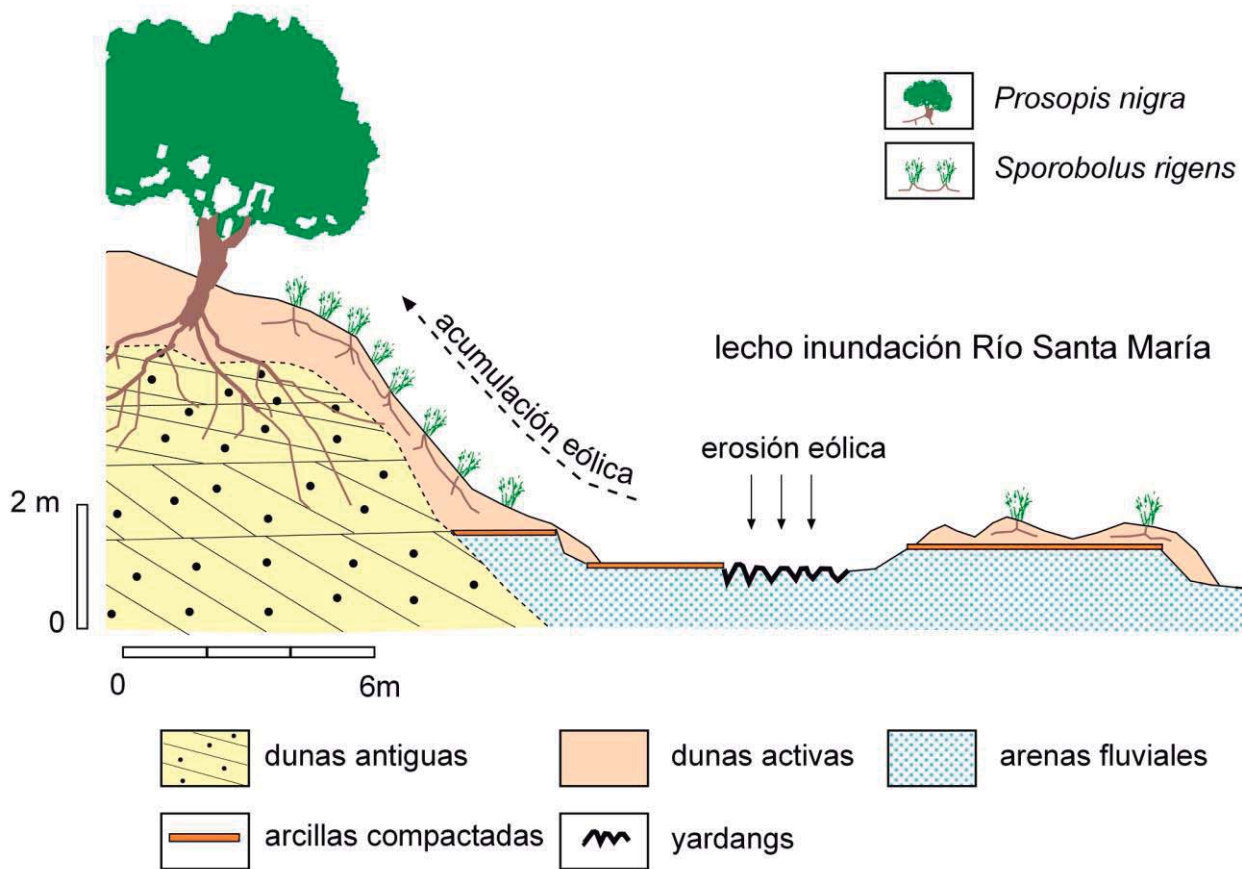


Fig. 7. Esquema de la acción erosiva en el lecho aluvial del Río Santa María y superposición de dunas nuevas sobre las antiguas, con su vegetación característica.

Fig. 7. Schema of the erosive processes of the alluvial riverbed of Santa María River and new dunes overlying older ones, with characteristic vegetation.

100 km/h son responsables de la movilización de gran cantidad de sedimentos y el mantenimiento de polvo persistente en suspensión en el ambiente. En estos momentos se forman los principales corredores de deflación y *blowouts* en algunas áreas, al tiempo que en otras se producen rápidos avances de las dunas. Por otra parte, la disponibilidad de materiales finos está asegurada por el

arrastre de las crecidas fluviales durante el verano ya que el Río Santa María recoge los sedimentos de las zonas distales de los abanicos aluviales desde la cabecera en el valle de El Cajón y a lo largo de su trazado en la depresión desde Pie de Médano hasta su confluencia con el Río Calchaquí. Esta abundancia de sedimento fino incluso se ve intensificada por la continua removilización de los mismos, que son retomados en el fondo del cauce y zonas distales de los conos septentrionales, son trasladados a los campos de dunas y vueltos a recoger posteriormente aguas arriba por el propio río para volver a ser transportado en la siguiente crecida.

Este dispositivo en cinta transportadora se cumple con su mayor efectividad en aquellos sectores en que el cauce se coloca en posición transversal al viento como en Los Médanos 1 y en La Ciénega, en la parte final del río Calchaquí, pero también cuando el viento toma longitudinalmente el sedimento del lecho actual y cauces antiguos, como ocurre en Los Médanos 2. Esta disponibilidad ha podido disminuir en función de la mayor estabilización de las dunas en fases de mayor humedad coincidiendo también con una mejor protección de vegetación en las laderas y menor actividad erosiva y de transporte de los torrentes laterales.

El campo de dunas que hemos denominado Los Médanos 1 se extiende por el área protegida de “Los Médanos” y el valle del R o Yacochuya (Figs. 3, 5). En septiembre de 2003, en las cercanías el puente sobre la Ruta Nacional 68 fue posible estudiar las dunas antiguas debido a que una intensa acción eólica creó varios corredores de deflación. Estas dunas, que estaban hasta entonces fijadas por algarrobos fueron modeladas en yardangs alineados, lo que permitió que de forma excepcional se observaran cortes y pudieran tomarse muestras para su análisis (muestras CTE-1-CTE-2 y CTE-3-CTE-4) (Fig. 8). Hay que tener en cuenta que el muestreo se produjo en un momento excepcional ya que en posteriores trabajos de campo (año 2013) varios meandros del Río Santa María habían sido cortados artificialmente y la zona había sido aplanada y repoblada de tamarices (*Tamarix gallica*).

La zona Los Médanos 2 se inicia en los meandros del Río Santa María, al sur de la Ruta Nacional 68 y se prolonga hasta la zona al N de Tolombón (Figs. 3, 5). También en este caso se pudo en 2003 obtener muestras de las dunas antiguas en una zona cercana a la Ruta Nacional 40 (CTE-5 y CTE-6) (Fig. 8). Además, los corredores de deflación profundizaron hasta niveles arqueológicos infrayacentes. Pudieron identificarse fragmentos de cerámica correspondientes a varias piezas que podían ser remontadas *in situ* (Fig. 6). Estos restos fueron fotografiados y clasificados para establecer su tipología y cronología cultural relativa, que se sitúa en el período Formativo superior.

Características de los sedimentos dunarios de Cafayate

La sedimentología de las dunas muestra estructuras claramente eólicas, con estratificación cruzada e inclinaciones hacia el S y SE coherentes con el actual régimen de vientos. La distribución granulométrica (Fig. 9a) da valores medios desde 98 μm a 15 μm . Para el rango intercuartil (RIQ), el tamaño del sedimento que representa el 25 % y 75 % de la población muestra que éste abarca las fracciones de 177-200 y 88-105 μm – excepto en la muestra CTE-4 que

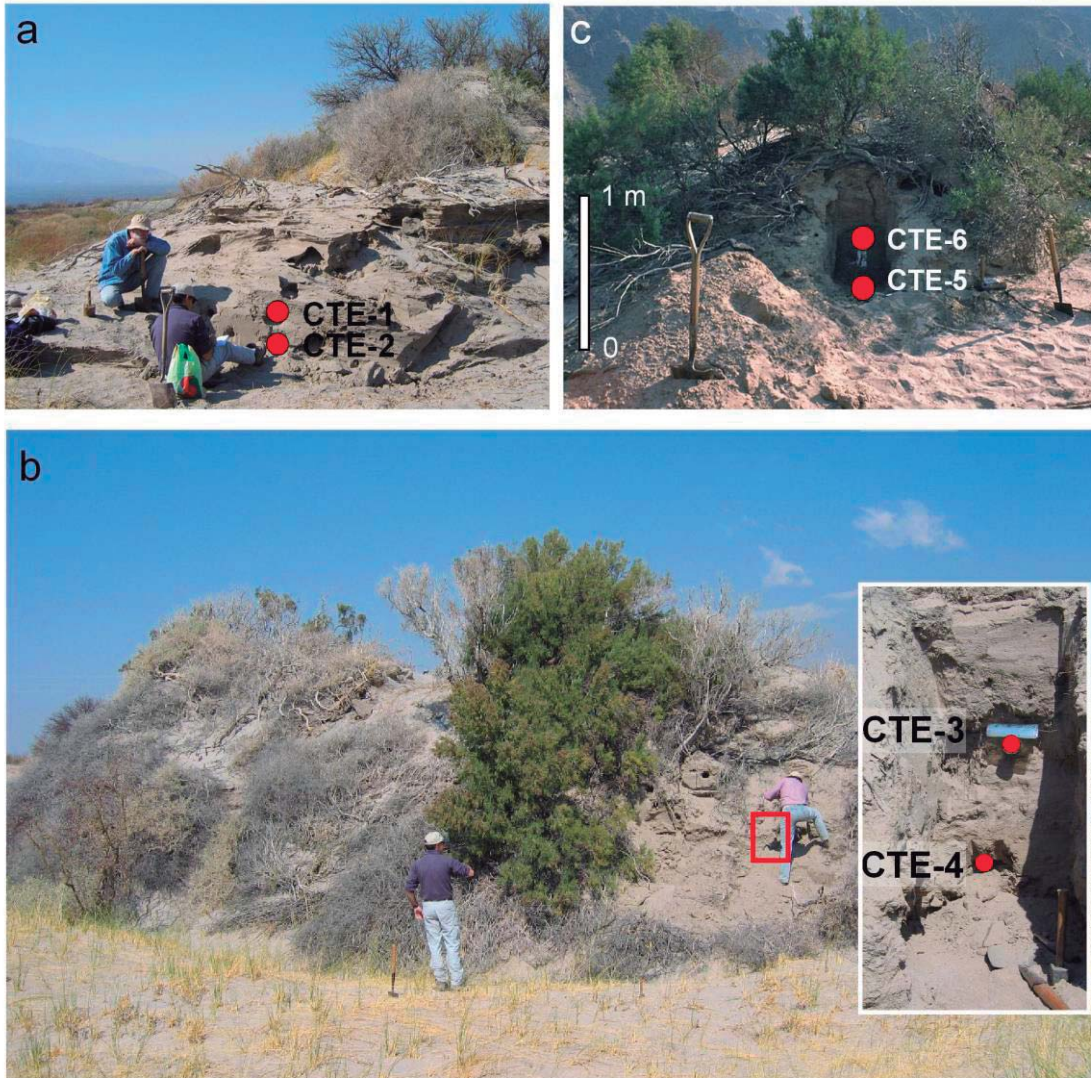


Fig. 8. Puntos de muestreo para las dataciones OSL, análisis mineralógico y granulométrico; a) Muestras CTE-1 y CTE-2, cerca del puente de la Ruta Nacional 68 sobre río Santa María; b) Muestras CTE-3 y CTE-4 en duna residual, cerca del lugar anterior; c) Muestras CTE-5 y CTE-6, cerca de la ruta entre Cafayate y Tolombón.

Fig. 8. Sampling points for OSL datings, mineralogical and granulometric analysis; a) Samples CTE-1 and CTE-2, close to National Road 68, bridge over Santa María River; b) samples CTE-3 and CTE-4 in residual dune, close to previous location; c) Samples CTE-5 and CTE-6, close to the road between Cafayate and Tolombón.

muestra una distribución más fina. Las modas en el tamaño de los granos corresponden a las fracciones de 146-125 μm y 177-146 μm (CTE-3, 5, 6) o levemente más pequeñas. CTE-1 muestra dos modas para las fracciones 125-105 μm y 146-125 μm . La muestra CTE-4 presenta una distribución plurimodal – una de las modas se ubicó en la fracción más fina – y la distribución es sesgada hacia estos valores. Aquellos rasgos anómalos pueden estar relacionados con la parte específica de la duna a la que pertenece la muestra. Las distribuciones en dunas son aproximadamente simétricas de modo que las medias están en la misma fracción que las modas. Ni las medidas centrales de tendencia (media, moda) ni los rangos intercuartiles están por debajo de los 5 μm .

La mineralogía del sedimento determinada por DRX muestra que los principales componentes son cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa (Fig. 9b), con pequeñas cantidades de filosilicatos (biotita, clorita) y algún cristal volcánico. Contienen una gran variedad de minerales pesados, con augita como principal componente, junto con zircón, turmalina y hornblenda. Ocasionalmente también aparece andalucita, granate y epidota. Esta asociación mineralógica revela en general un bajo grado de madurez química. Por otra parte, los granos de arena

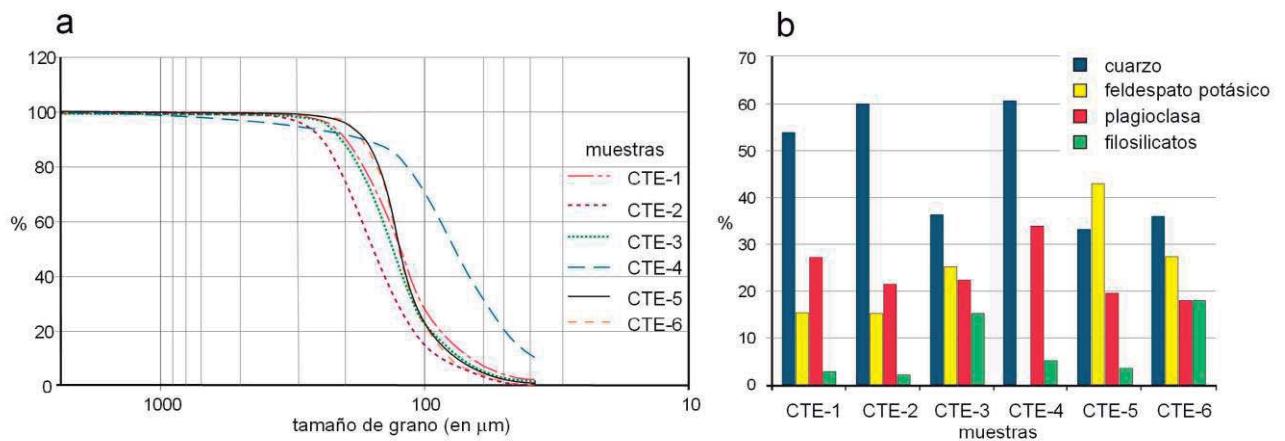


Fig. 9. Curvas granulométricas acumulativas de las arenas (x = eje en escala logarítmica). Composición mineralógica semicuantitativa de las muestras de arenas.

Fig. 9. Accumulative granulometric curves of the sands (x axe in logarithmic scale. Semiquantitative mineralogical composition of the sampled sands.

observados con baja magnificación (x10) muestran formas subangulares, superficies de cleavage y marcas de percusión, lo que indica un bajo nivel de alteración química, con escaso transporte y nula cementación. Todo ello es compatible con los sedimentos aluviales del entorno, procedentes de un basamento geológico granítico y metamórfico.

Cronología del campo de dunas de Cafayate

Estas muestras exhiben baja sensibilidad de la señal de OSL en cuarzo y valores de transferencia térmica relativamente altos. Rendimientos limitados significan que solo un número restringido de alícuotas pueden ser medidos, y las edades estimadas son por lo tanto consideradas preliminares. Sin embargo, dentro de estas limitaciones, emergen algunos patrones significativos. Aunque las muestras exhiben un grado relativamente alto de dispersión entre alícuotas, los valores de Dosis equivalente (D_e) forman agrupamientos discretos dentro de cada muestra. Basado en las relaciones lito y morfoestratigráficas entre las diferentes muestras es posible la interpretar que estos agrupamientos son significativos. Una muestra, código de campo CTE-1 (código de laboratorio K0159) mostró dos agrupamientos en D_e , correspondiendo a edades estimadas de 1010 ± 80 AD y 1780 ± 60 AD. Todas las alícuotas medidas tienen valores de dosis correspondientes a uno de estos dos grupos, se interpretó que la duna se depositó inicialmente en 1010 AD y fue retrabajada localmente alrededor del 1780 AD, por lo tanto incluimos ambos valores en la Tabla 1.

Código campo	Código Lab.	Prof. (m)	D_e(Gy) ± 1 sigma	Dosis (mGy/a) ± 1 sigma	Edad (b2k)	Edad (años AD) ± 1 sigma
CTE-1	K0159	1.15	0.87 \pm 0.24	3.87 \pm 0.19	220 \pm 60	1780 \pm 80
CTE-1*	K0159	1.15	3.82 \pm 0.24	3.87 \pm 0.19	990 \pm 80	1010 \pm 80
CTE-2	K0160	1.50	0.89 \pm 0.19	3.85 \pm 0.20	230 \pm 50	1770 \pm 50
CTE-3	K0161	2.50	0.96 \pm 3.40	4.55 \pm 0.22	350 \pm 50	1650 \pm 50
CTE-4	K0162	3.00	2.06 \pm 0.19	5.01 \pm 0.24	410 \pm 40	1590 \pm 40
CTE-5	K0163	1.25	3.41 \pm 0.28	5.33 \pm 0.24	640 \pm 60	1360 \pm 60
CTE-6	K0164	1.00	3.46 \pm 0.89	5.31 \pm 0.24	650 \pm 170	1350 \pm 170

Tabla 1. Dataciones OSL obtenidas del campo dunario de Cafayate.

Table 1. OSL datings obtained from the dunefield from Cafayate.

En los demás casos, la edad presentada en la Tabla 1 se basó en el grupo mínimo de valores de dosis, o un agrupamiento significativo dentro del rango de valores. Destacamos que las edades estimadas para cada par de muestras (CTE-1 y 2; CTE-3 y 4; CTE-5 y 6) muestra un alto grado de consistencia estratigráfica, proveyendo confiabilidad a estos resultados.

La cronología de los restos arqueológicos da apoyo a los datos de OSL. Los fragmentos cerámicos encontrados en la superficie de los pasillos de deflación interdunarios en Los Médanos 2 (Fig. 6) son fragmentos de una escudilla perteneciente al período Formativo tardío. El período

Formativo (ca. 500 AC-1000 AD) marca los inicios de los asentamientos sedentarios en la región. En el área de estudio, hay asentamientos domésticos y cementerios dispersos en el fondo de valle, piedemonte y arroyos (Ledesma y Subelza, 2009). Entre los fragmentos cerámicos comunes de esta época es posible encontrar cerámica gris y roja pulida, gris incisa, y tipos finos pintados (tales como Guachipas polícromo) (Scattolin, 2006). Los rasgos estilísticos de los fragmentos encontrados son similares a los descritos por Nastri (2003) en Morro del Fraile y Scattolin (2003) en Morro de las Espinillas (1140 ± 70 AP- 1160 ± 40 AP) y por Ledesma y Subelza (2014) en La Banda de Arriba 1 datados en 1110 ± 90 AP (885-1046 cal. AD). Tal como fue indicado anteriormente, estos materiales arqueológicos fueron encontrados in situ bajo las dunas, por lo que pertenecen a asentamientos establecidos en la zona con anterioridad al 1350 AD cuando la zona fue cubierta por dunas (muestras CTE-5 y CTE-6, Tabla 1).

Implicaciones geomorfológicas y paleoambientales

Las dataciones obtenidas en el campo de dunas de Cafayate junto a la caracterización tipológica de los materiales arqueológicos permitieron deducir la alternaciade fases de activación y fijación de los sistemas eólicos. La información cronológica se ha complementado con datos procedentes de fuentes históricas a partir de la llegada de los españoles en 1635 AD. Estos datos hacen posible inferir la evolución paleoambiental del área de Cafayate durante el último milenio (Fig. 10a). Es necesario dejar claro que los valores de mayor o menor humedad expuestos no son absolutos, sino relativos con respecto a la situación ambiental actual.

Las condiciones ambientales existentes en el Holoceno superior son objeto todavía de numerosas contradicciones. Se acepta en términos generales que en la región central de Argentina existió una etapa seca desde 1500-1000 AC hasta ca. 1000 AD (Carignano, 1999; Iriondo et al., 2009). Sin embargo, en otras regiones como el valle de Tafí, Sampietro Vattuone (1999, 2002) señala la existencia de un paleouelo datado en 2480 ± 110 AP que refleja condiciones climáticas más húmedas que las actuales. A similares conclusiones llegan Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (en prensa) y Peña-Monné y Sampietro-Vattuone (en prensa) al analizar el marco evolutivo general de dicho valle. Según Garralla (1999), estas condiciones persistieron hasta 875 ± 20 AP. Este clima favorable y la existencia de suelos bien desarrollados permitieron el establecimiento de asentamientos de la cultura Tafí (Período Formativo, 2300-1100 AP) en el valle (Sampietro Vattuone et al., 2011). Kulemeyer et al. (2013), en el valle de El Bolsón (Catamarca) también indican condiciones húmedas entre 750 AC y 500 AD. En definitiva, todo parece indicar que el clima era más húmedo antes del año 1000 AD y que en torno a dicha fecha

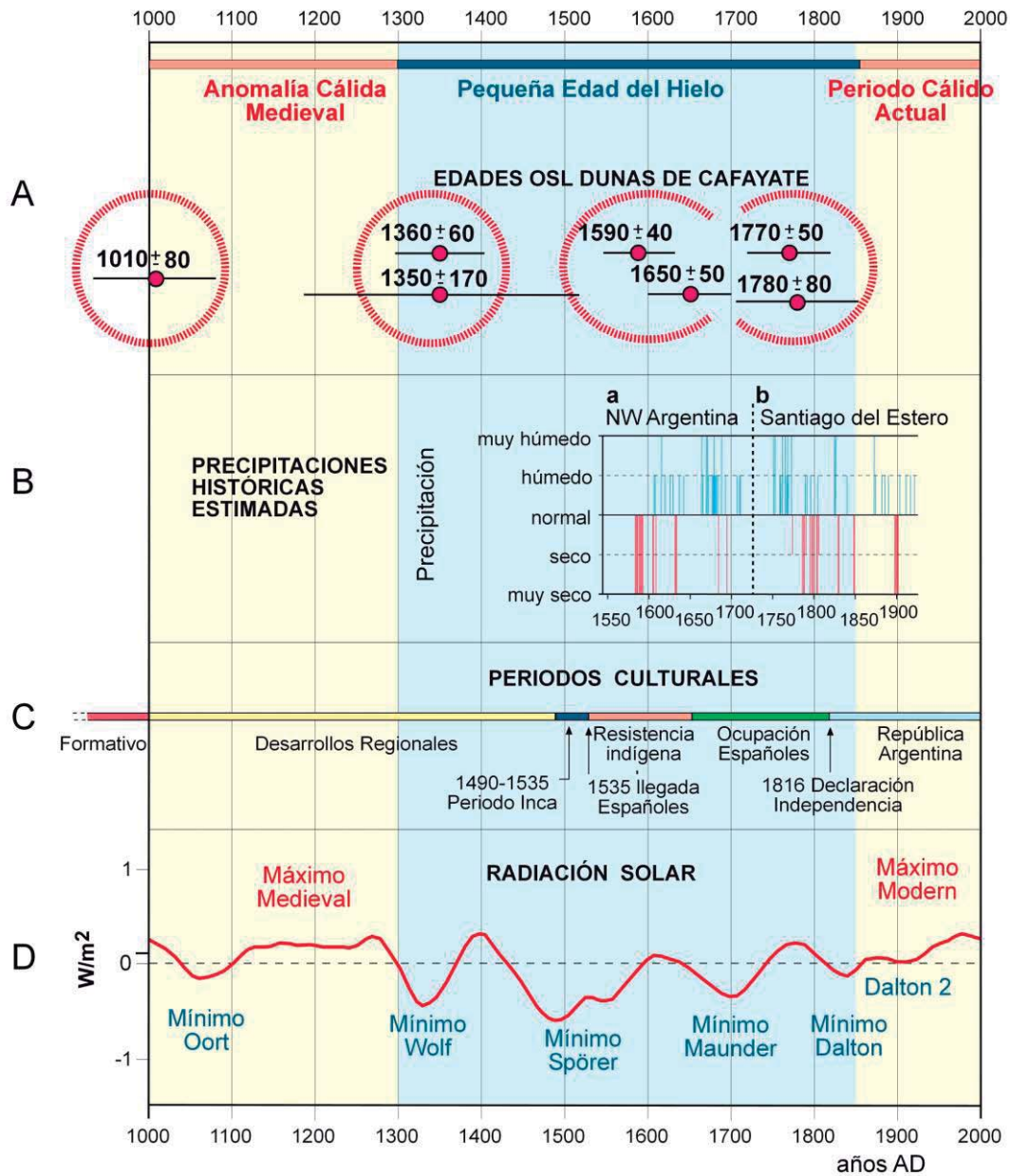


Fig. 10. a) Edades OSL de las 4 etapas de activación de las dunas de Cafayate y relación con las fases climáticas del último milenio; **b)** Precipitaciones históricas estimadas a partir de fuentes documentales históricas: **1)** Noroeste Argentino (Prieto et al., 1995); **2)** Santiago del Estero (Herrera et al., 2003); **c)** Periodos culturales del valle de Santa María; **d)** Eventos de radiación solar en el último milenio (Steinhilber et al., 2009).

Fig. 10. a) OSL ages of the 4 active stages of the dunes of Cafayate and relation with the climatic phases of the last millennium; **b)** historical precipitations estimated from historical sources: **1)** NW Argentina (Prieto et al. 1995); **2)** Santiago del Estero (Herrera et al. 2003); **c)** Cultural periods of Santa María Valley; **d)** Solar irradiance events during the last millennium ((Steinhilber et al., 2009).

se generaron cambios importantes en las condiciones ambientales en la primera mitad de la Anomalía Cálida Medieval (ACM).

Kulemeyer et al. (2013) marcan los límites de una fase árida en El Bolsón entre el 500 y 1275 AD, junto con evidencias importantes de antropización. Desde una perspectiva regional, las culturas del Formativo (ca. 500 AC-1000 AD), que se caracterizaron por la adopción de actividades agrarias y del sedentarismo en asentamientos dispersos, colapsaron en estos momentos. Los asentamientos del siguiente período cultural, los Desarrollos Regionales (ca. 1000-1500 AD), se caracterizaron por el desarrollo de sistemas de poblamiento concentrado y la aparición de estructuras defensivas (Sayago et al., 2003). En el valle de Tafí, Sampietro Vattuone (2010), Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (en prensa) y Peña-Monné y Sampietro-Vattuone (en prensa) identifican una fase seca con altos niveles de erosión a partir de FECHAS. En los Andes se registra igualmente una fase seca, especialmente en el Altiplano boliviano, con el colapso de la civilización Tiwanaku (Orloff y Kolata, 1993; Binford et al., 1997; Abbott et al., 2003). En esta fase de aridez se sitúan los resultados de la muestra CTE-1 (1010 ± 80 AD) (Tabla 1).

Durante la segunda mitad de la ACM (ca. 1100-1300 AD), Carignano (1999) señala la presencia de suelos incipientes en el centro de Argentina, así como un aumento en la extensión de algunos lagos como Mar Chiquita (Iriondo, 1999) y un alto dinamismo fluvial (Iriondo y Kröhling, 1996), estabilización de acumulaciones eólicas previas y mayor extensión de los bosques subtropicales.

La información regional sobre la Pequeña Edad del Hielo (PEH) (ca. 1300-1850 AD) es más abundante y es la fase dentro de la cual se encuentra la mayor cantidad de dataciones obtenidas en este estudio, mostrando tres momentos de activación eólica (Fig. 8). Las dunas más antiguas del sur de Cafayate, próximas a la localidad de Tolombón (muestras CTE-5 y CTE-6) muestran una reactivación eólica en 640 ± 60 y 650 ± 170 b2k (1360 ± 60 y 1350 ± 170 AD) (Tabla 1, Fig. 10a) coincidiendo con la fase inicial de la PEH (S XIV). Debajo de esta acumulación eólica se encontraron los fragmentos de cerámicos del Formativo superior (ca. 900 AD) descritos en posición primaria.

Otro conjunto de dataciones (muestras CTE-3 y CTE-4) aportan una edad de 350 ± 50 y 410 ± 40 b2k (1650 ± 50 y 1590 ± 40 AD) (Tabla 1, Fig. 10a). Estas fechas de activación eólica pueden relacionarse con información histórica contemporánea. Por ejemplo, Prieto et al. (1995) y Prieto y Herrera (2009) establecieron la existencia de un período seco entre 1580 y 1641, con sequías catastróficas en la década de 1580 (Fig. 10b). Valero-Garcés et al. (2003) igualmente

ponen en evidencia un período seco en el registro del Lago Peinado (Altiplano de Argentina) antes de 1680, coincidente con esta etapa. El inicio de esta fase se produce aproximadamente en las mismas fechas de llegada de los Españoles (1535) a la región y el período de resistencia indígena (1535-1665) (Fig. 10c).

Finalmente, se distingue una reactivación eólica más reciente correspondiente a las muestras CTE-1 y CTE-2 (220 ± 60 y 230 ± 50 b2k; 1780 ± 60 y 1770 ± 50 AD) (Tabla 1, Fig. 10a). Los datos recopilados por López de Albornoz (1997) muestran el azote de las sequías registradas entre 1760 y 1800, con intensidad máxima entre 1780 y 1790. Herrera et al. (2003) y Prieto y García Herrera (2009) también indican una fase muy seca entre 1785 y 1805 en la región de Tucumán. Estas condiciones ambientales podrían explicar la reactivación de las dunas en la depresión de Cafayate, pero este período también coincide con la ocupación Española (Fig. 10a) por lo que es posible que el desencadenante sea mixto, ya que en estos momentos se intensificó el sobrepastoreo en las zonas bajas de la región, usándose el valle como zona de invernada para el engorde de mulas con destino para el Alto Perú entre 1770 y 1805 (Rodríguez, 2008), contabilizándose 70.000 cabezas de ganado en esos momentos en el valle (Mata de López 1998, 2000).

Estas fases secas fueron interrumpidas probablemente por etapas subhúmedas en las que no hay registro eólico en la depresión de Cafayate. Nuevamente los datos históricos muestran que en el período entre mitad del siglo XVII e inicios del XVIII hubo condiciones más húmedas, especialmente entre 1663 y 1710 (Prieto et al., 1995) cuando inundaciones y sequías causaron momentos de alta variabilidad climática (Prieto et al., 2000, 2009; Herrera et al, 2003). Valero-Garcés et al. (2003) también señala mayor humedad en el Altiplano argentino para finales del siglo XVII. Bajo estas condiciones, la vegetación pudo cubrir amplias áreas de los campos de dunas, incluyendo el desarrollo de bosques de algarrobos, estabilizando las acumulaciones de arena.

Interpretación paleoambiental y cambios climáticos regionales

La alternancia de períodos de actividad y estabilidad eólicas deducidas del estudio del campo de dunas de Cafayate constituye la respuesta a los cambios ambientales regionales producidos durante el Holoceno superior. Estas fluctuaciones son la respuesta a la humedad disponible en escala de décadas y siglos, traducida en cambios de densidad de la cubierta vegetal que favoreció la dinámica de reactivación o de estabilización de los campos de dunas en medios áridos (Viles y Goudie, 2003; Tsoar, 2005; Hugenholtz y Wolfe, 2005). En este mismo sentido, el

impacto antrópico sobre la vegetación puede causar respuestas semejantes de inestabilidad, como se ha señalado para el siglo XVIII.

En cualquier caso, el espacio de tiempo para la activación eólica (condiciones más secas) o para su estabilización (condiciones más húmedas) está sujeto siempre a la superación de determinados umbrales. En los sistemas geomorfológicos eólicos la existencia de un período de relajación ha sido reconocido como respuesta a la influencia climática (Hugenholtz and Wolfe, 2005) tanto afectando a la movilidad de dunas como al desarrollo de la cubierta vegetal (Barchyn and Hugenholtz, 2013). Por ello los intervalos definidos en la figura 10a como transición entre las distintas fases es difícil de precisar.

El modelo de circulación atmosférica regional está dominado por los cambios en la posición estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) (Garreaud et al., 2009), así como en la posición e intensidad del Área de Bajas Presiones Continentales de El Chaco (Minetti y Vargas, 2005). Tal mecanismo genera una situación de monzón continental (Bianchi y Yáñez, 1992; Zhou y Lau, 1998). Durante el verano austral la posición más meridional de la ITCZ y la máxima convección en la Cuenca Amazónica y en la célula de Baja Presión de El Chaco favorece la llegada de vientos húmedos desde E y NE. Como resultado, el 80% de la lluvia cae durante el verano (Bianchi y Yáñez, 1992; Minetti et al., 2005). Por otra parte, el elemento climático más significativo de América del Sur es el fenómeno de El Niño o ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Mann et al., 2000), jugando un papel decisivo en la variabilidad climática regional (Moy et al., 2002a; Garreaud et al., 2009). La preeminencia de los períodos El Niño (cálido) o La Niña (frío) produce cambios rápidos en la humedad y en los vientos. El evento ENSO cálido genera lluvias intensas en en la costa del Pacífico así como en La Pampa Argentina; sin embargo, este mismo evento genera períodos secos en el Altiplano (Garreaud et al., 2003) y en las depresiones internas – como en el caso de Cafayate (Sayago et al., 2003; Trauth et al., 2000, 2003a). Este contraste regional en las lluvias debido al fenómeno El Niño se aprecia igualmente en los datos climáticos históricos. Así, Prieto et al. (1995) señala la existencia de un período de sequía entre 1580 y 1641 AD en los valles Calchaquíes coincidiendo con época de humedad en áreas de la zona llana de Salta y Tucumán, donde las inundaciones llegaron a trasladar la ubicación de la ciudad de San Miguel de Tucumán en 1585 AD. Estas mismas directrices climáticas debieron estar operativas durante el último milenio y los períodos de activación de las dunas de Cafayate pueden ser correlacionados con eventos cálidos ENSO.

Un buen registro de la evolución temporal de la ENSO durante el Holoceno ha sido obtenido a partir del sondeo del lago Pallcacocha (Ecuador) (Moy et al., 2002a). De acuerdo con

Moy et al. (2002b) los eventos cálidos ENSO fueron raros durante el Holoceno creciendo su intensidad desde 7000 cal AP y especialmente desde ca. 1200 cal AP), disminuyendo hacia la actualidad. Para el último milenio es posible observar una concentración de estos eventos en el lago Pallcacocha con picos significativos alrededor de 1020-1060 AD, 1320-1350 AD, and 1600 AD (Moy et al., 2002b), coincidente con nuestras dataciones. Igualmente, los registros fluviales más relevantes del desierto de Atacama (valle del Moquegua, sur de Perú) han sido relacionados con “mega- años” ocurridos en fechas similares (1300-1400 AD y 1607-1608 AD (Keefer et al., 2001); ca. 1330 y ca. 1650 AD (Magilligan et al., 2008)). Estos eventos son húmedos en la costa del Pacífico y en la vertiente occidental de los Andes, donde se ubica el lago mencionado; son de características secas en el Altiplano y valles y depresiones internas del Noroeste de Argentina (Bookhagen et al., 2001; Magilligan et al., 2008). La coincidencia temporal con las fases áridas registradas en las dataciones de las dunas de Cafayate es muy evidente. Incluso la fase de activación dunaria de alrededor de 1770 AD está representada por un pico máximo en el registro de la laguna Pallcacocha, por lo que pudo tener un claro origen climático, aparte de la influencia antrópica inferida de la documentación histórica.

Por otra parte, para el último milenio también se ha establecido una conexión entre fases secas y húmedas en relación con cambios en la radiación solar (Bond et al., 2001; Mayewski et al., 2004, Amman et al., 2007). La gráfica de reconstrucción de estos eventos por Steinhilber et al. (2009) muestra coincidencias con el registro eólico de Cafayate (Fig. 10d), como en el caso del Mínimo Wolf con la fase árida de 1350 AD así como entre los mínimos Spörer y Maunder y algunos intervalos más húmedos desde mediados del S XVII e inicios del XVIII. Además, las tendencias a largo término en la actividad de la ENSO se atribuye a cambios orbitales inducidos por la variación en la insolación (Moy et al., 2002a). En consecuencia, la actividad eólica en las dunas de Cafayate durante el último milenio parece estar relacionado con la variabilidad de la ENSO y conectado más remotamente con la variabilidad en la insolación.

CONCLUSIONES

La investigación geomorfológica, el análisis sedimentario y los datos cronológicos de actividad eólica en la región de Cafayate (Noroeste Argentino) permitió establecer las conclusiones que se desarrollan a continuación.

El campo dunario de Cafayate, situado en el sector Norte del valle de Santa María puede ser dividido en dos sectores: Los Médanos 1 y Los Médanos 2. Las dunas están localizadas

siguiendo la dirección de los vientos dominantes del noreste. Los tipos dunarios son barjanas, barjanoides y dunas parabólicas. Parte de las dunas están fijadas por la vegetación típica del área, mientras que otros sectores son reactivados durante eventos de vientos fuertes a través de corredores de deflación y blowouts.

Las arenas provienen del lecho del Río Santa María. La mineralogía revela la presencia dominante de cuarzo y feldespato. La augita es el mineral pesado más frecuente lo que indica bajo grado de madurez química de los sedimentos eólicos. La forma subangular de los granos y los rasgos mecánicos superficiales (abrasión y corrosión) indican transportes de corta distancia. Hay cutanes de sales formados por evaporación durante los períodos más secos. También se identificaron algunos fragmentos de vidrio volcánico.

Durante el último milenio, las fases húmedas y secas alternantes favorecieron la movilización y estabilización de las dunas. Estas fases se establecieron mediante dataciones OSL, restos arqueológicos y datos históricos. Los intervalos secos ocurrieron entre ca. 1000-1100 AD; 1300-1420 AD; 1550-1680 AD; 1740-1850 AD; y el período cálido actual. Estos intervalos tuvieron distintas duraciones y solo las fases de activación dunaria actual y la comprendida entre 1740 y 1850 parecen tener un componente antrópico fuerte sumado a causas ambientales. Estas etapas áridas estuvieron separadas por intervalos más húmedos.

Los períodos de activación dunaria están conectados a períodos ENSO cálidos que en el Noroeste Argentino son áridos, al contrario que en la costa pacífica. De acuerdo a las comparaciones realizadas con las fases cálidas de ENSO registradas en el lago Pallcacocha solo el período comprendido entre 1740-1850 AD tiene más influencia antrópica que los demás considerados, eminentemente climáticos.

La presencia de ocupación humana en el valle de Santa María está evidenciada por los fragmentos cerámicos encontrados yaciendo debajo de las dunas. Las poblaciones humanas pudieron influenciar las condiciones ambientales del área. Sin embargo, este efecto solo fue documentado en la activación dunaria del S XVIII, información sostenida a partir de las investigaciones relacionadas con los cambios de uso del suelo en la región.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del Grupo de Investigación Cuaternaria (PALEOQ) parte del Instituto de Ciencias Ambientales (IUCA) de la Universidad de Zaragoza – Gobierno de Aragón. Fue financiada por IberCaja, Acción Especial de Investigación de la Universidad de Zaragoza (España), PIP 0030 CONICET, PICT 0490 ANPCyT (Argentina), PIUNT 26 G550. Agradecimientos al Ing. Jorge Romero por facilitarnos los datos meteorológicos de Bodegas Etchart, Finca La Florida (Cafayate) y a la Dra. R Ledesma por su apoyo incondicional.

BIBLIOGRAFIA

- Abbott, M.B., Wolfe, B.B., Wolfe, A.P., Seltzer, G.O., Aravena, R., Mark, B.G., Polissar, P.J., Rodbell, D.T., Rowe, H.D., Vuille, M., 2003. Holocene paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment studies. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology* 194, 123-137.
- Ammann, C.M., Joos, F., Schimel, D.S., Otto-Bliesner, B.L., Tomas, R.A., 2007. Solar influence on climate during the past millennium: results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104, 3713-3718.
- Báez, W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortíz-Yañes, A., Viramonte, J.G., Bustos, E., Giordano, G., López, J.F., 2015. Estratigrafía y evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32(1), 29-49.
- Barchyn, T.E., Hugenholtz, C.H., 2013. Reactivation of supply-limited dune fields from blowouts: A conceptual Framework for state characterization. *Geomorphology* 201, 172-182.
- Bianchi, A.R., Yáñez, C.E., 1992. *Las precipitaciones en el Noroeste Argentino*. INTA Salta, Argentina.
- Binford, M.W., Kolata, A.L., Brenner, M., Janusek, J.W., Seddon, M.T., Abbott, M., Cuertis, J.H., 1997. Climate variations and the rise and fall of an Andean Civilization. *Quaternary Research* 47, 235-242.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M., Showers, W., Hoffmann, S., Loti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G., 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate Turing the Holocene. *Science* 294, 2130-2136.
- Bookhagen, B., Haselton, K., Trauth, M.H., 2001. Hydrological modelling of a Pleistocene landslide-dammed lake in the Santa Maria Basin, NW Argentina. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology* 169, 113-127.
- Bossi, G.E., Georgieff, S.M., Gavrilloff, I.J.C, Ibáñez, L.M., Muruaga, C.M., 2001. Cenozoic evolution in the intramontane Santa Maria basin, Pampean Ranges, Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 725-734.
- Carignano, C.A., 1999. Late Pleistocene to recent climate change in Córdoba Province, Argentina: Geomorphological evidence. *Quaternary International* 57-58, 117-134.
- Collantes, M.M., 2001. *Paleogeomorfología y Geología del Cuaternario de la cuenca del río Tafí, Depto. Tafí del Valle, Prov. de Tucumán, Argentina*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- Collantes, M. M., 2007. Evolución morfogénica y paleoambiental del valle de Tafí durante el Pleistoceno tardío y Holoceno, en: Arenas, P., Manasse, B., Noli E. (Eds.), *Paisajes y procesos sociales en Tafí del Valle. Tucumán*. Argentina. Magna Publicaciones, pp. 261-288.
- Collantes M. M., Sayago, J.M., 1987. Paleogeomorfología del Valle de Tafí, provincia de Tucuman. *X Congreso Geológico Argentino* 3, 221-324.
- Cortezzi, C.R., Pavlicevic, R.E., Rivelli, F.R., 1984. Estudio sedimentológico de las arenas de las dunas de Cafayate, Provincia de Salta, República Argentina. *Geociencias* 3, 47-56.
- Fernández-Turiel, J.L., Saavedra, J., Pérez-Torrado, F.J., Rodríguez-González, A., Alias, G., Rodríguez-Fernández, D., 2012. Los depósitos de ceniza volcánica del Pleistoceno superior-Holoceno de la región de Tafí del Valle – Cafayate, Noroeste de Argentina. *Geo-Temas* 13, CD 07-279P, 3pp.

- Fernández-Turiel, J.L., Saavedra, J., Pérez-Torrado, F.J., Rodríguez-Gonzalez, A., Carracedo, J.C., Osterrieth, M., Carrizo, J.I., Esteban, G., 2013. The largest Holocene eruption of the Central Andes found. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, USA.
- Forman, S.L., Goets, A.F.H., Yuhas, R.H., 1992. Large scale stabilized dunes on the High Plains of Colorado: understanding the landscape response to Holocene climates with the aid of images from the space. *Geology* 20, 145-148.
- Galván, A.F., 1981. *Descripción geológica de la Hoja 10e, Cafayate, Provincias de Tucumán, Salta y Catamarca. Escala 1:200.000*. Servicio Geológico Nacional, Boletín 177, Buenos Aires.
- Galván, A., Ruiz Huidobro, O.J., 1965. Geología del valle de Santa María. Estratigrafía de las formaciones Mesozoico-Terciarias. *2º Jornadas Geol. Argentinas III*, 217-230.
- Garralla, S., 1999. Análisis polínico de una cuenca sedimentaria en el Abra del Infiernillo, Tucumán, Argentina. *Primer Congreso de Cuaternario y Geomorfología*, La Pampa, pp. 11.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Clement, F., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 5-22.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009. Present-day South-American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 180-195.
- Gaylord, D.R., 1990. Holocene paleoclimatic fluctuations revealed from dune and interdune strata in Wyoming. *Journal of Arid Environments* 18, 123-138.
- Hanson, P.R., Joeckel, R.M., Young, A.R., Horn, J., 2009. Late Holocene dune activity in the Eastern Platte River valley, Nebraska. *Geomorphology* 103, 555-561.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., Villanueva García, A., Schellenberger, A., 2006. Rock avalanching in the NW Argentine Andes as a result of complex interactions of lithologic, structural and topographic boundary conditions, climate change and active tectonics, en: Evans, S.G., Scarascia, G., Strom, A.L., Hermanns, R.L. (Eds.), *Massive rock slope failure: new models for Hazard assessment*. NATO Science series 4 Earth and Environmental Sciences, Springer, Berlin, pp. 497-520.
- Hermanns, R.L., Schellenberger, A., 2008. Quaternary tephrochronology helps define conditioning factors and triggering mechanisms of rock avalanches in NW Argentina. *Quaternary International* 178, 261-275.
- Hermanns, R.L., Strecker, M.R., 1999. Structural and lithological control on large Quaternary rock avalanches (sturzstroms) in arid zone north-western Argentina. *GSA Bulletin* 111(6), 934-948.
- Hermanns, R.L., Trauth, M.H., Niedermann, S., McWilliams, M., Strecker, M.R., 2000. Tephrochronology constraints on the temporal distribution of large landslides in NW Argentina. *Journal of Geology* 108, 35-52.
- Herrera, R.G., Prieto, M.R., García-Herrera, R., 2003. Floods in the semiarid Argentinean Chaco during the 17th to 19th centuries, en: Thorndycraft, V.R., Benito, G., Barrientos, M., Llasat, M. (Eds.), *Proceedings of Palaeofloods, Historical Data & Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment*. CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, pp. 107-112.
- Hesse, R., 2009. Using remote sensing to quantify aeolian transport and estimate the age of the terminal dune filed Dunas Pampa Blanca in southern Perú. *Quaternary Research* 71, 426-436.
- Hillier, S., 2003. Quantitative analysis of clay and other minerals on sandstones by X-ray powder diffraction (XRPD), en: Worden, R.H., Morod, S. (Eds.), *Clay mineral cements in sandstones*. International Association of Sedimentologists, Special Publication, pp. 213-251.
- Hueck, K., 1950. Estudio ecológico y fitosociológico de los médanos de Cafayate (Salta). *Lilloa* 23, 63-115.
- Hugenholtz, C.H., Wolfe, S.A., 2005. Recent stabilization of active sand dunes on the Canadian prairies and relation to recent climate variations. *Geomorphology* 68, 131-147.
- Iriondo, M., 1990. Map of the South American plains—its present state. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 6, 297-308.
- Iriondo, M., 1999. Climatic changes in the South American plains: records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International* 57-58, 93-112.
- Iriondo, M., Brunetto, E., Kröhling, D., 2009. Historical climate extremes as indicators for typical scenarios of Holocene climatic periods in the Pampean Plains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 283, 107-119.
- Iriondo, M., Kröhling, D., 1996. El Sistema Eólico Pampeano. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino* 5 (1), 1-68.
- Keefer, D.K., Moseley, M.E., deFrance, S.D., 2003. 38 000-year record of floods and debris flows in the Ilo region of southern Peru and its relation to El Niño events and great earthquakes. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194(1-3), 41-77.

Peña Monné, J.L., Sancho Marcén, C., Sampietro Vattuone, M.M., Rivelli, F., Rhodes, E., Osácar Soriano, M.C., Rubio Fernández, V., García Giménez, R.

- Kulemeyer, J.J., Lupo, L., Madozzo, M.C., Cruz, A., Cuenya, P., Maloberti, M., Cortés, G., Korstanje, A., 2013. Desarrollo del paisaje holoceno en la cuenca de El Bolsón: gente y ambiente en procesos de cambio y estabilidad. *Diálogo Andino* 41, 25-44.
- Lancaster, N., 1997. Response of eolian geomorphic systems to minor climate change: examples from the southern Californian deserts. *Geomorphology* 19, 333-347.
- Ledesma, R., 2004. El Alisar y El Divisadero. Dos Sitios Arqueológicos con Pinturas Rupestres en Cafayate, Salta. *Cuadernos* 15, 31-46.
- Ledesma, R., 2005. Contexto de producción de pinturas rupestres en El Divisadero (Cafayate, Salta, República Argentina). *Andes* 16, 305-323.
- Ledesma, R., 2011. Las apropiaciones territoriales prehispánicas en Cafayate (Salta). *Estudios Sociales del NOA* 11, 129-146.
- Ledesma, R., Subelza, C., 2009. Alcances y limitaciones para caracterizar las ocupaciones formativas en Cafayate (Salta). *Andes* 20, 75-109.
- Ledesma, R., Subelza, C., 2014. *Arqueología de Cafayate, Salta: un enfoque a través de su cerámica y arte rupestre*. Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- Levin, N., Ben-Dor, E., 2004. Monitoring sand dune stabilization along the coastal dunes of Ashdod-Nizamin, Israel, 1945-1999. *Journal of Arid Environments* 58, 335-355.
- Lo Celso, M., Ledesma, R., 2005. Sitios arqueológicos formativos en el Municipio de Cafayate (Salta). Avances de investigación, en: *Actas I Jornadas de Antropología*. Facultad de Humanidades, pp: 267-282. Universidad Nacional de Salta.
- López de Albornoz, C., 1997. Crisis agrícolas y crisis biológicas en la jurisdicción de San Miguel de Tucumán en la segunda mitad del siglo XVIII, en: García Acosta, V. (Ed.), *Historia y Desastres en América Latina* 2, pp. 163-190.
- Magilligan, F.J., Goldstein, P.S., Fisher, G.B., Bostick, B.C., Manners, R.B., 2008. Late Quaternary hydroclimatology of a hyper-arid Andean watershed: Climate change, floods, and hydrologic responses to the El Niño-Southern Oscillation in the Atacama Desert. *Geomorphology* 101, 14-32.
- Maldonado, M. G., Neder, L., Sampietro Vattuone, M.M. 2014. Distribución espacial de los asentamientos de los periodos de Desarrollos Regionales e Inca en el tercio central de la sierra de Quilmes (Valle de Yocavil-Tucumán). *Arqueología* 20: 13-29.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 2000. Long-term variability in the El Niño/Southern Oscillation and associated teleconnections, en: Díaz, H.F., Markgraf, V., (Eds.), *El Niño and the Southern Oscillation, multiscale variability and global and regional impacts*. Cambridge University Press, pp. 357-412.
- Mata de López, S.E., 1998. Población y producción a fines de la colonia. El caso de Salta en el Noroeste Argentino en la segunda mitad del siglo XVIII. *Andes* 9, 143-169.
- Mata de López, S.E., 2000. *Tierra y poder en Salta. El noroeste argentino en vísperas de la independencia*. Diputación de Sevilla, España.
- May, J.H., 2008. A geomorphological map of the Quebrada de Purmamarca, Jujuy, NW Argentina. *Journal of Maps* 5, 211-224.
- May, J.H., 2013. Dunes and dunefields in the Bolivian Chaco as potential records of environmental change. *Aeolian Research* 10, 89-102.
- Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, J.C., Karlén, W., Maasch, K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., Kreveld, S.V., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig, E.J., 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62(3), 243-255.
- Mendoza, E.A., 2005. El clima y la vegetación natural, en: Minetti, J.L. (Ed.), *El clima del Noroeste argentino*. Editorial Magna, San Miguel de Tucumán, pp. 267-319.
- Minetti, J.L., Poblete, A.G., Longhi, F., 2005. Los mesoclimas del Noroeste argentino, en: Minetti, J.L. (Ed.), *El clima del Noroeste argentino*. Editorial Magna, San Miguel de Tucumán, pp. 217-233.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., 2005. La circulación regional en el Noroeste Argentino y condiciones del tiempo asociadas, en: Minetti, J.L. (Ed), *El clima del Noroeste argentino*. Editorial Magna, San Miguel de Tucumán, pp. 77-115.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002a. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162-165.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002b. *Laguna Pallcacocha Sediment Color Intensity Data*. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2002-76. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

- Muhs, D.R., 1985. Age and paleoclimatic significance of Holocene sands dunes in northeastern Colorado. *American Association of Geographers Annals* 75, 556-582.
- Muhs, D.R., 2004. Mineralogical maturity in dunefields of North America, Africa and Australia. *Geomorphology* 59, 247-269.
- Munywka, K., 2005. Synchrony of Southern Hemisphere Late Pleistocene arid episodes: A review of luminescence chronologies from arid eolian landscapes south of Equator. *Quaternary Science Reviews* 24, 2555-2583.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements* 37, 377-381.
- Nastri, J., 2003. Aproximaciones al espacio Calchaquí, en: Cornell, P., Stenborg, P. (Eds.), *Local, Regional, Global. Prehistoria, Protohistoria e Historia de los Valles Calchaquíes*. Etnologiska Studier 6, pp. 99-125.
- Ortloff, C., Kolata, A.L., 1993. Climate and collapse: Agro Ecological Perspectives on the decline of the Tiwanaku State. *Journal of Archaeological Science* 20, 195-221.
- Osácar, M.C., Sancho, C., Peña-Monné, J.L., García, R., Rubio, V., 2006. Composición mineralógica de las acumulaciones holocenas de Cafayate (NO de Argentina): Datos preliminares. *Macla* 6, 341-343.
- Peña-Monné, J.L., Sancho-Marcén, C., Sampietro-Vattuone, M.M., Rivelli, F., Rhodes, E.J., Osacar-Soriano, M.C., Rubio-Fernández, V., García-Giménez, R., 2015. Environmental change over the last millennium recorded in the Cafayate Dune field (NW Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 438, 352-363.
- Peña-Monné, J.L., Sampietro-Vattuone, M.M. en prensa. Geomorphological dynamic changes during the Holocene through ephemeral stream analyses from Northwest Argentina. *Catena*.
- Prieto, M.R., García Herrera, R., 2009. Documentary sources from South America: Potential for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 196-209.
- Prieto, M.R., Herrera, R., Dussel, P., 1995. Las condiciones climáticas durante la conquista y colonización del Noroeste argentino (1580-1710). *Primer Congreso de Investigación Social, Región y Sociedad en Latinoamérica. Su problemática en el Noroeste Argentino*. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, pp. 227-239.
- Prieto, M.R., Herrera, R., Dussel, P., 2000. Archival evidence for some aspects of historical climate variability in Argentina and Bolivia during the 17th and 18th centuries, en: Smolka, P., Volkheimer, W. (Eds.), *Southern Hemisphere Paleo- and Neoclimates*. Springer, pp. 127-142.
- Pye, K., Tsoar, H., 2009. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Second edition. Springer.
- Rapela, C.W., 1976. El basamento metamórfico de la región de Cafayate, provincia de Salta. Aspectos petrológicos y geoquímicos. *RAGA* 31(3), 203-222.
- Rhodes, E.J., Bronk-Ramsey, C., Outram, Z., Batt, C., Willis, L., Dockrill, S., Bond, J., 2003. Bayesian methods applied to the interpretation of multiple OSL dates: high precision sediment age estimates from Old Scatness Broch excavations, Shetland Isles. *Quaternary Science Reviews* 22, 1231-1244.
- Rodríguez, L.B., 2008. *Después de las desnaturalizaciones Transformaciones socio-económicas y étnicas al sur del valle Calchaquí, Santa María, fines del siglo XVII - fines del XVIII*. Editorial Antropofagia. Buenos Aires, Argentina.
- Salfity, J.A., Marquillas, R.A., 1999. La cuenca Cretácico-Terciaria del Norte argentino, en: Caminos, R. (Ed.) *Geología Argentina. Anales Instituto de Geología Argentina*, pp. 613-626.
- Sancho, C., Peña-Monné, J.L., Rivelli, F., Rhodes, E., Muñoz, A., 2008. Geomorphological evolution of the Tilcara alluvial fan (Jujuy Province, NW Argentina): Tectonic implication and palaeoenvironmental considerations. *Journal of South America Earth Sciences* 26, 68-77.
- Sampietro Vattuone, M.M., 1999. Propuesta para un modelo climático del Formativo en el valle de Tafí. *13th Congreso Nacional de Arqueología Argentina*, Córdoba (Argentina), pp. 30-31.
- Sampietro Vattuone, M.M., 2002. *Contribución al conocimiento geoarqueológico del valle de Tafí Tucumán (Argentina)*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Sampietro Vattuone, M.M., 2010. *Espacio, ambiente y los inicios de la agricultura indígena en el noroeste argentino: Un enfoque geoarqueológico*. Editorial JAS. España.
- Sampietro Vattuone, M.M., Neder, L., 2011. Quaternary landscape evolution and human occupation in northwestern Argentina. *Geological Society*, London, Special Publications 352, 37-47.
- Sampietro-Vattuone, M.M., Peña-Monné, J.L. en prensa. Holocene paleoenvironmental evolution in the Tafí Valley (NW Argentina): Climate change and human intervention. *Quaternary Research*.

- Sampietro Vattuone, M.M., Roldán, J., Neder, L., Maldonado, M.G., Vattuone, M.A., 2011. Formative pre-Hispanic agricultural spoils in northwest Argentina. *Quaternary Research* 75, 36-44.
- Sayago, J.M., 1999. El Cuaternario de la región pre-puneña del noroeste argentino, en: Caminos, R. (Ed.), *Geología Argentina*, pp. 688-691.
- Sayago, J.M., Collantes, M.M., Arcuri, C., 1991. El glaciario Finopleistoceno-Holoceno y su relación con los depósitos clásticos pedemontanos en la región montañosa de Tucumán (Argentina). *Bamberger Geographische Schriften* 11, 155-168.
- Sayago, J.M., Powell, J., Collantes, M.M., Neder, L., 1998. El Cuaternario, en: Gianfrancisco, M., Puchulu, M.E., Durango de Cabrera, J., Aceñolaza G.F. (Eds.), *Geología de Tucumán*. Publicación Especial Colegio Graduados Ciencias Geológicas de Tucumán, pp. 111-128.
- Sayago, J.M., Sampietro, M.M., Caria, M., Collantes, M.M., 2003. Paleoclimatic changes and human crises in North West Argentina during the European Medieval Warm Period, en: Ruiz-Zapata, M.B., Dorado, M., Valdeolmillos, A., Gil, M., Bardají, T., de Bustamante, I., Martínez, I. (Eds.), *Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean Region*. Alcalá de Henares and INQUA, pp. 81-87.
- Scattolin, M.C., 2003. Recursos arquitectónicos y estilos cerámicos en los siglos IX y X d. C. en el valle de Santa María (Catamarca, Argentina), en: Cornell, P., Stenborg, P. (Eds.), *Local, Regional, Global. Prehistoria, Protohistoria e Historia de los Valles Calchaquíes*. Etnologiska Studier 46, 63-98.
- Scattolin, M.C., 2006. Contornos y confines del universo iconográfico precalchaquí del valle de Santa María. *Estudios Atacameños* 32, 119-139.
- Steinhilber, F., Beer, J., Fröhlich, C., 2009. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters* 36, L19704.
- Teeuw, R.M., Rhodes, E.J., 2004. Aeolian activity in NE Amazonia: OSL dating of Late Pleistocene to Holocene palaeodunes in the Rupununi savanna, Guyana. *Journal of Quaternary Science* 19, 49-54.
- Thomas, D.S.G., 2013. Aeolian plaeoenvironments of desert Landscapes, en: Shroder, J.F. (Ed.), *Teatrise on Geomorphology, 11: Aeolian Geomorphology*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, pp. 356-374.
- Toselli, A.T., Rossi, J.N., Rapela, C.W., 1978. El basamento metamórfico de la Sierra de Quilmes (República Argentina). *RAGA* 33(2), 105-121.
- Trauth, M.H., Strecker, M.R., 1999. Formation of landslide-dammed lakes during a wet period between 40,000 and 25,000 yr BP in Northwestern Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology* 153, 277-287.
- Trauth, M.H., Alonso, R.A., Haselton, K.R., Hermanns, R.L., Strecker, M., 2000. Climate change and mass movements in the NW Argentine Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 179, 243-256.
- Trauth, M.H., Bookhagen, B., Marwan, N., Strecker, M.R., 2003a. Multiple landslide clusters record Quaternary climate changes in the Northwestern Argentine Andes. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194(1-3), 109-121.
- Trauth, M.H., Bookhagen, B., Müller, A.B., Strecker, M.R., 2003b. Late Pleistocene climatic change and erosion in the Santa Maria Basin, NW Argentina. *Journal of Sedimentary Research* 73, 82-90.
- Tsoar, H., 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A* 357, 50-56.
- Valero-Garcés, B.L., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Edwards, L., Schwalb, A., Ratto, N., 2003. Patterns of regional hydrological variability in central southern Altiplano (18°-26°S) lakes during the last 500 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 319-338.
- Viles, H.A., Goudie, A.S., 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews* 61, 105-131.
- Wolfe, S.A., Hugenholtz, C.H., Evans, C.P., Huntley, D.J., Ollerhead J., 2007. Potential aboriginal-occupation-induced dune activity, Elbow Sand Hills, Northern Great Plains, Canada. *Great Plains Research* 17, 173-192.
- Zhou, J., Lau, K.M., 1988. Does a monsoon climate exist over South-America)? *Journal of Climatology* 11, 1020-1040.