

# Cambios ambientales durante el Holoceno superior registrados en secuencias morfosedimentarias fluvio-eólicas del Valle de Santa María (Noroeste Argentino)

M. M. Sampietro Vattuone<sup>(1)</sup>, J. L. Peña Monné<sup>(2)</sup>, M. G. Maldonado<sup>(1)</sup>, C. Sancho Marcén<sup>(3)</sup>,  
W. Báez<sup>(4)</sup>, A. Sola<sup>(5)</sup> y A. Blasi<sup>(6)</sup>

(1) Laboratorio de Geoarqueología. Universidad Nacional de Tucumán y CONICET.

4000 San Miguel de Tucumán (Argentina)

sampietro@tucbbs.com.ar

gabrielmaldonado23@yahoo.com.ar

(2) Dpto. de Geografía y Ordenación del territorio e Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA). Universidad de Zaragoza 50009 Zaragoza (España)

jlpena@unizar.es

(3) Dpto. de Ciencias de la Tierra e Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

Universidad de Zaragoza 50009 Zaragoza (España)

csancho@unizar.es

(4) Unidad de recursos geológicos y geotérmicos del Instituto de investigaciones en energía no convencional.

CONICET-Universidad Nacional de Salta, A4400FVY Salta (Argentina)

focobaez@hotmail.com

(5) Unidad de recursos geológicos y geotérmicos del Instituto de investigaciones en energía no convencional.

CONICET-Universidad Nacional de Salta, A4400FVY Salta (Argentina)

alfonsoseptimo@yahoo.com.ar

(6) CIC - División Mineralogía, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (Argentina)

adriana\_blasi@hotmail.com

## RESUMEN

El valle de Santa María se sitúa en el sector septentrional de las Sierras Pampeanas del Noroeste Argentino. A pesar de sus características áridas, en el pasado albergó importantes poblaciones prehispánicas que pudieron sustentarse mediante la explotación agropastoril de este ambiente, aprovechando fluctuaciones de mayor humedad. El estudio de los registros morfosedimentarios fluvio-eólicos de los sectores de El Paso y Cafayate han proporcionado datos de interés para una aproximación a la reconstrucción paleoambiental regional durante el Holoceno superior. Para ello se han utilizado técnicas geomorfológicas, estratigráficas, arqueológicas y cronológicas (radiocarbono y fuentes documentales complementadas con edades OSL previas). La intercalación de cenizas volcánicas también ha permitido correlaciones cronológicas al ser utilizadas como niveles guías. A partir de estos datos se dedujeron alternancias de períodos húmedos y secos a lo largo de los últimos 2800 años. Durante las fases más húmedas la estabilidad geomórfica fue suficiente para permitir el desarrollo de suelos y una mejor cobertura vegetal, favoreciendo la ocupación humana. Para la interpretación paleoambiental se han utilizado cronozonas bien definidas en Europa, al no haber denominaciones propias del continente sudamericano. Dentro de la secuencia evolutiva paleoambiental destacan los períodos húmedos establecidos regionalmente hacia 2800-2500 BP, período intermedio Romano (80-280 AD) y la LALIA (*Late Antique Little Ice Age*) (536-660 AD), mientras que las fases secas abarcan la Época Romana y la Anomalía Cálida Medieval. Por otra parte, para el último milenio se reconocen fases de reactivación de dunas en torno a los años 1000, 1350, 1650 y 1770 AD separados por fluctuaciones más húmedas, algunas evidenciadas por la presencia de un paleosuelo (siglo XV) y por datos documentales históricos (siglos XVII-XVIII).

Palabras clave: eólico, fluvial, gearqueología, Holoceno superior, paleoambientes.

## **Late Holocene environmental changes from fluvio-aeolian morpho-sedimentary sequences (Santa María Valley, northwest Argentina)**

### ABSTRACT

The Santa María valley is located in the northern sector of the Sierras Pampeanas in Northwest Argentina. In spite of its arid characteristics, it was a densely populated area during the Pre-hispanic period. The populations developed an agropastoral economy, taking advantage of the wetter epochs that characterized some periods. The study of fluvio-aeolian records of the El Paso and Cafayate areas yielded interesting data for regional paleoenvironmental reconstruction. Geomorphological maps, field surveys, and archaeological digs were complemented with the detailed stratigraphic record of several points, together with radiocarbon and OSL dating. Alternating wetter and drier periods were inferred for the last 2,800 years. The wetter phases generated enough stability to allow soil formation and a better plant cover, thus favouring human settlements. For the paleoenvironmental interpretation, well defined European chronozones were used because there are no South American denominations. Within the sequence, some wetter periods stand out, such as the one between 2,800-2,500 BP, the intermediate Roman Period (80-280 AD), and the LALIA (Late Antique Little Ice Age) (536-660 AD), while the drier phases comprise the Roman Epoch and the Medieval Climate Anomaly. Moreover, dune active phases during the last millennium were determined for 1,000, 1,350, 1,650, and 1,770 AD approximately, separated by wetter periods recorded by the presence of a paleosol (15th century) and historical data (17th and 18th centuries).

Keywords: Aeolian, fluvial, geoarchaeology, Late Holocene, paleoenvironments

### ABRIDGED ENGLISH VERSION

#### **Introduction and Methods**

The main objective of this paper is to summarize the paleoenvironmental information about the Santa María valley obtained from fluvial and aeolian records functioning together. The main characteristics of the deposits as well as their chronology were taken into account together with the cycles of dune activation associated with environmental changes in wetter and drier phases, changes in the fluvial dynamics, and the processes of human occupation of the territory.

The study area is located in the center of the Santa María Valley, in Salta and Tucumán provinces (Fig. 1). This valley is a south-north oriented tectonic basin located in the northern section of the Sierras Pampeanas in Northwest Argentina. The mountain area is mainly composed of granitic and metamorphic rocks of low and medium grade, with Upper Cretaceous and Tertiary detrital and carbonated rocks in the eastern sector. The bottom of the valley is located at between 1,800 and 1,550 m asl.

The Santa María River has a wide fluvial bed (Fig. 2a) but it only flows during the summer, the rest of the year being almost dry. Normally it carries sand, silt, and clay forming bars between shallow braided channels. Despite the aridity characterizing this region (with annual precipitation of about 200 mm), it was a densely populated area during the Pre-hispanic period, when the populations developed an agropastoral economy.

Detailed geomorphological cartography was complemented with a field survey in El Paso and Cafayate, where the most relevant fluvio-aeolian accumulations were discovered. Samples for OSL dating were treated at the Laboratory of the Australian National University (Peña-Monné et al., 2015). Two archaeological excavations were made (Maldonado, 2016) and ceramic, soil, and phytolytic analyses were conducted. Archaeological bones were dated at the University of Arizona AMS Facility Laboratory; the datings were calibrated using OxCal v.4.2 with the SHcal 13 calibration curve. Finally, the tephras were analyzed with a portable x-ray fluorescence spectrometer (Niton XL3t GOLDD Thermo Scientific) for geochemical characterization.

#### **Results and discussion**

The riverbed of the main river and the distal area of the alluvial fans of tributary rivers are the sources of the sands moved by the dominant N and NE direction winds. The main dunes are barchan and parabolic dunes (Fig. 2b), partially fixed by vegetation adapted to these environments (Figs. 2c, 3). During the Holocene, the dry/wet environmental fluctuations, the availability of sandy sediments, and the human activity in some periods were determinant factors in their functionality.

Three points located in the western side of the main river were studied at the El Paso location (Fig. 4). El Paso 1 is located in an aeolian formation, in the central section of a meander, where several archaeological digs were made (Maldonado, 2016). A 6 m deep pit was obtained from probe 13, under the upper dune (Fig.

5); several potsherds of the Chimpa Phase as well as charcoal and bone fragments were recovered from its lower sections (A, B1). The layer was dated to 1862-1746 cal BP (Fig. 6a). The next section (B2) contained potsherds from Bañado Phase, dated to 1421-1371 cal BP and 1297-1276 cal BP. Besides, probe 16, a 2 m deep pit (Fig. 6b), has a younger chronology. Its base (C) presented silty-clay sediments with potsherds from the Bañado and Colalao phases. After an erosive disruption in the sequence, it was possible to identify a paleosoil (Fig. 6b), associated with Inca Period ceramics, dated to 490-333 cal BP.

El Paso 2 is located next to the Santa María River (Fig. 4) in an erosive scarp, which is 3.6 m high and 2.9 m long (Figs. 6c, 7). At its lower section, a fluvial channel with potsherds from Bañado Phase was identified (Figs. 6c, 7a, b). This phase is overlain by a paleosoil stratigraphically equivalent to that of sondeo 16.A. A 5-10 cm volcanic ash layer (V2) was found almost at the top of the profile (Figs. 6c, 7c). According to regional data (Sampietro-Vattuone and Peña-Monné, 2016), this tephra layer dates to sometime after the 15th to 16th centuries given its position over the paleosoil. Very degraded aeolian deposits cover the top of the profile (E).

El Paso 3 is located in the piedmont of Sierra de Quilmes (Fig. 4a). It covers a set of parabolic dunes and some barchans. They are traversed by small tributary channels from the middle lower section of the cones developed at the piedmont of the ranges. In one of the profiles, it was possible to see a 2 m high fluvial accumulation with a narrow layer of volcanic ashes (Fig. 8) from the same stage as that of El Paso 2, according to the mineralogical and geochemical analyses (Fig. 9).

The dune field of Cafayate (Fig. 1), composed of fluvial sands (Fig. 11), is located in the northern sector of the Santa María Valley, 60 km away from El Paso (Fig. 1). OSL datings of the old dunes (Peña-Monné et al., 2015, 2016) showed the existence of 4 phases of activation: the first one dated to  $1010 \pm 80$  AD, contemporary with the start of the Medieval Climatic Anomaly; the second to  $1350 \pm 170/1,360 \pm 60$  AD; the third to  $1590 \pm 40/1650 \pm 50$  AD; and finally the fourth to about  $1770 \pm 50/1,780 \pm 80$  AD. The last three phases are coincident with arid episodes of the Little Ice Age chronozone (Fig. 12). They could be related with three of the sun irradiance anomalies (Spörer, Maunder, and Dalton minimums) which were found to be related to the wetter intervals between dune activations from the 16th century to the beginning of the 19th century.

The different exposed proxies and the chronological information obtained from the two areas of the Santa María valley allowed us to trace the first evolutionary approach by linking local proxies with Late Holocene climatic stages, such as the GISP2 curve (Alley, 2000), Bond Events (Bond et al., 1997), and the cultural periods of the Santa María valley (Fig. 12). The chronological data provided by the radiocarbon datings from El Paso (Maldonado, 2016), together with the OSL datings published by Peña-Monné et al. (2015) indicating dune active phases, are displayed in a graphic showing the changes in the relative environmental humidity over the last 2,800 years (Fig. 12). The result is an alternating succession of dry/hot phases and other relatively cold/wet ones. These alternating periods are faster when we get nearer the present day. The presence of paleosoils and historical records of some of these stages corroborates the evolutionary model for recent times.

## Conclusions

El Paso and Cafayate sectors combine outstanding information about the paleoenvironmental evolution and human settlements in the Santa María Valley. El Paso yielded the oldest climate insights dated through C14 and archaeological materials (Chimpa, Bañado, and Colalao phases), associated with relatively wet and cold phases of the Intermediate Roman Period and the LALIA. Throughout the Medieval Climatic Anomaly, a hot, dry period, morpho-sedimentary records have erosive characteristics. This stage is represented in the Cafayate dune field by an active dune period at approximately 1,000 AD.

For the last millennium, the most relevant paleoenvironmental data derive from OSL datings of the oldest dunes in Cafayate. Three phases of activation were detected around the 14th, 17th, and 18th centuries, during the Little Ice Age. These relatively dry phases were separated by wetter periods that favoured, at times, periods of environmental stabilization, such as that between 1350 and 1650, reflected by the development of a soil at El Paso 2 and El Paso 3.

Finally, it is important to highlight the relationship observed between the cold/wet periods at a global level and the periods of big occupational settlements (Chimpa and Bañado phases, and Inca Period), especially when the development of a soil was observed concomitantly with dune stabilization by plant growth. In addition, the drier episodes imply geomorphological ruptures as well as intensification in land occupation by human populations.

## Introducción

En ambientes áridos, las secuencias morfosedimentarias eólicas y fluviales constituyen registros de inte-

res paleoambiental (Thomas, 2013). Incluso los cambios ambientales menores, como las fluctuaciones climáticas del Holoceno, han tenido gran influencia en la dinámica de los campos de dunas (Muhs, 1985;

Forman *et al.*, 1992; Lancaster, 1997, Hanson *et al.*, 2009) y en la actividad fluvial (Sancho *et al.*, 2008; Faust *et al.*, 2004; Waters y Haynes, 2001). En las zonas áridas argentinas, las dunas y loess cuaternarios cubren gran extensión territorial. Sin embargo, los trabajos sobre las dunas con activación durante el Holoceno son escasos, destacando las publicaciones de Tripaldi y Forman (2007), Tripaldi *et al.* (2013) sobre la región pampeana. Aún menor es la información sobre las acumulaciones dunares y fluviales en depresiones intermontanas andinas y subandinas, como es el caso del valle de Santa María, en el Noroeste Argentino (Fig. 1). Para esta cuenca se cuenta con algunos antecedentes sobre la mineralogía y sedimentología de las dunas del sector septentrional (Cortelezzi *et al.*, 1984; Osácar *et al.*, 2006) y, en fechas más recientes, los estudios geomorfológicos generales de Peña-Monné *et al.* (2015, 2016a) sobre la depresión de Cafayate, de Peña-Monné y Sampietro-Vattuone (2016a) y Peña Monné *et al.* (2016b) sobre los conos aluviales de Colalao del Valle y El Pichao así como unas primeras aproximaciones geoarqueológicas a las dunas de El Paso (Maldonado, 2016; Maldonado *et al.*, 2016a). En esta región, los depósitos eólicos están íntimamente relacionados con el suministro que proporcionan las acumulaciones fluviales, que actúan como áreas fuente, de manera que gran parte del material movilizado en las dunas tiene un origen fluvial. Igualmente, la fuerte interacción de los conos aluviales y de los sistemas fluviales con el ámbito eólico genera depósitos mixtos fluvio-eólicos.

Este trabajo tiene como principal objetivo realizar una síntesis de la información paleoambiental que puede ser extraída de las principales áreas con recubrimiento fluvial y eólico (fluvio-eólico) del valle de Santa María, que se extienden entre las provincias de Catamarca, Tucumán y Salta, en el Noroeste Argentino. La realización de cartografías geomorfológicas ha permitido delimitar las áreas de mayor dinamismo de las dunas y la dinámica fluvial durante el Holoceno superior y en el momento actual. Se ha establecido la cronología de los principales ciclos de activación de las dunas en relación con fluctuaciones de humedad ambiental y disponibilidad hídrica, cambios en la dinámica fluvial, desarrollo de suelos y procesos relacionados con la ocupación humana del territorio. Además, muchos registros presentan la particularidad de contener materiales arqueológicos interestratificados de valor cronológico para la reconstrucción paleoambiental regional en los últimos 2800 años. Finalmente, se analiza la conexión existente entre estos datos y la dinámica general de los cambios ambientales de carácter regional y global

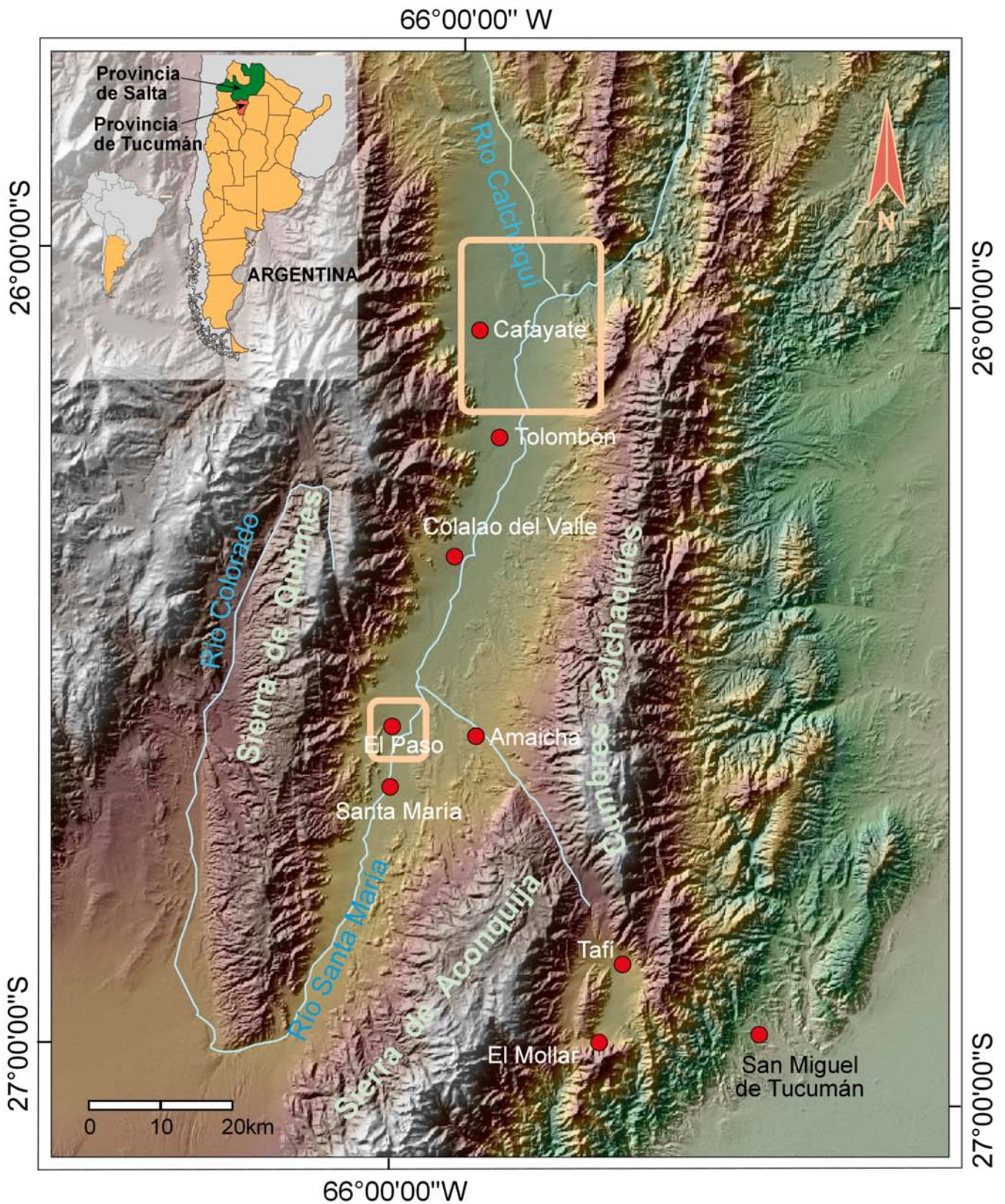
del Holoceno superior, utilizando en algunos casos denominaciones propias de cronozonas europeas al no estar todavía definidas en Sudamérica.

### Zona de estudio

El valle de Santa María es una cuenca tectónica de dirección Sur-Norte ubicada en el sector septentrional de las Sierras Pampeanas del Noroeste Argentino. Su límite este está formado por las Cumbres Calchaquíes (4177 m) y la Sierra de Aconquija (5500 m) y el occidental por la Sierra de Quilmes (5488 m) (Fig. 1). Geológicamente, estas sierras se componen de granito y rocas metamórficas de bajo y medio grado (Toselli *et al.*, 1978). En su sector oriental, afloran también rocas detríticas y carbonatadas continentales de edad Cretácico superior-Mioceno del Grupo Salta (Bossi *et al.*, 2001) y del Plioceno del Grupo Santa María (Galván, 1981). Estos últimos materiales fueron intensamente replegados y fallados por las fases compresivas pliocenas, al tiempo que se generaron las fallas marginales de la fosa tectónica de Santa María.

El valle tiene disposición elongada y presenta una fuerte disimetría entre ambos márgenes; la vertiente oriental, al pie de las Cumbres Calchaquíes y de Aconquija, es muy extensa permitiendo el desarrollo de un sistema complejo de glaciares y conos aluviales mientras que el piedemonte de la Sierra de Quilmes es más corto y abrupto y está formado por un sistema de conos aluviales que alcanzan las márgenes del río Santa María (Peña-Monné y Sampietro-Vattuone, 2016a), colector principal de la cuenca (Fig. 1). El área de estudio se centra en el sector del valle que forma parte de las provincias de Tucumán y Salta, situándose su fondo a altitudes entre 1800 m en el sector más meridional y 1550 m en su confluencia con el río Calchaquí. Este trabajo se ha centrado en zonas de El Paso, en el sector meridional, y de Cafayate, en el Norte (Fig. 1).

El río Santa María posee un lecho aluvial ancho, que puede alcanzar hasta los 600 m en algunos puntos, correspondiendo a un sistema de canales trenzados. Su funcionamiento se limita a la estación estival, permaneciendo prácticamente seco el resto del año. El material que transporta se compone únicamente de arena, limo y arcilla que forma barras de poca altura entre canales trenzados poco profundos. A lo largo del valle es posible identificar numerosos cauces abandonados en su extensa llanura aluvial, que ha ido formando por cambios en su posición a lo largo del Holoceno (Peña-Monné y Sampietro-Vattuone, 2016a).



**Figura 1.** Mapa de situación de las zonas de El Paso y Cafayate, en el valle de Santa María (provincias de Tucumán y Salta, Noroeste Argentino).

**Figure 1.** Location map of El Paso and Cafayate, Santa María valley (Tucumán and Salta provinces, Northwest Argentina).

El valle se sitúa en latitudes subtropicales, pero se caracteriza por una marcada aridez, debido al efecto barrera que crean las Cumbres Calchaquíes respecto a los vientos húmedos. Las precipitaciones varían a lo largo del valle entre 150 y 200 mm de media anual, que en un 85% se concentra en verano, mientras que el invierno es seco. La temperatura media anual es de 16-17° C y el clima se clasifica como de *tipo Bwk'* de Köppen (Minetti *et al.*, 2005). Un elemento meteorológico muy importante es la frecuencia de días con viento, con predominio casi total de las direcciones N-NE, de gran importancia para explicar las características y distribución de las dunas de la cuenca. Las condiciones ambientales secas determinan el predominio de vegetación perteneciente a la Eco región del Monte, compuesta de bosquetes de algarrobos (*Prosopis nigra*), jarillas (*Larrea divaricata*, *Larrea cuneifolia*) y pastizales de poáceas en las zonas bajas (Perea, 1995), así como arbustales xerófilos con cardones hacia los piedemontes (Mendoza, 2005).

A pesar de sus características áridas, en el pasado albergó importantes poblaciones prehispánicas que pudieron sustentarse mediante la explotación agropastoril de este ambiente. Las ocupaciones agrarias más tempranas del valle de Santa María, correspondientes al Holoceno superior, se iniciaron hacia el 3000 BP con el surgimiento de comunidades aldeanas durante el Período Formativo, cuyo patrón de asentamiento era disperso y continúa siendo relativamente poco conocido. Los estudios ceramológicos permiten identificar tres fases: Chimpa (*ca.* 100-450 AD), Bañado (450-800 AD) y Colalao (800-1000 AD) (Scattolin, 2007; Greco, 2012). Con posterioridad se estableció el Período Tardío (1000-1480 AD), caracterizado por el surgimiento de formas centralizadas de poder, aumento demográfico y un sistema de subsistencia agropastoril más intensivo que el precedente (Tarragó, 1987; Caggiano y Sempé, 1994) y asentamientos aglutinados en torno a lugares estratégicos desde el punto de vista ambiental (Maldonado *et al.*, 2016b). A finales del período prehispánico, aproximadamente entre 1480 y 1535 AD, se produjo la llegada de las huestes incas al Noroeste Argentino (Caggiano y Sempé, 1994).

## Metodología

En primera instancia se ha realizado la cartografía geomorfológica de detalle mediante interpretación visual de imágenes Google Earth (2013) y fotointerpretación de imágenes aéreas pancromáticas a escala 1:50000 (Spartam Air Service, 1969) de los sectores de El Paso y Cafayate, en los que se localizan las acu-

mulaciones eólicas más importantes. En ambos casos se realizaron trabajos de campo en las dunas funcionales para intentar localizar otras formaciones eólicas más antiguas, con intención de efectuar dataciones, así como trabajos de prospección arqueológica intensiva con el objeto de encontrar zonas de concentración de material arqueológico que apoyara igualmente la obtención de cronologías.

En las dunas de El Paso se efectuaron dos excavaciones arqueológicas (sondeos 13 y 16 de El Paso 1) por arqueólogos de la Universidad Nacional de Tucumán, en el marco de la realización de una tesis doctoral (Maldonado, 2016). En estos sondeos el material arqueológico cronológicamente diagnóstico y las dataciones se complementaron para definir una buena secuencia estratigráfica con indicadores paleoambientales. Se efectuaron estudios de la seriación de tipos cerámicos, análisis de suelos y sedimentos, registro y clasificación de fitolitos y se dataron cuatro muestras de hueso animal mediante radiocarbono en el Accelerator Mass Spectrometer Laboratory de la Universidad de Arizona; las fechas obtenidas fueron calibradas con la curva correspondiente al Hemisferio Sur utilizando el programa OxCal v. 4.2. Los datos son expresados en cal AP y/o Cal AD, con 68,2 % de certeza. También se localizaron otros perfiles de interés cronológico en El Paso 2, originados por la erosión del río Santa María. Por otra parte, se utilizaron los datos cronológicos procedentes de las dataciones obtenidas en las dunas de Cafayate mediante dataciones OSL (Peña-Monné *et al.*, 2015) que completan información paleoambiental de los últimos 1000 años. Además en estas mismas dunas se encontraron restos arqueológicos relacionados con la evolución geomorfológica del lugar, que fueron clasificados por el Laboratorio de Geoarqueología de la Universidad Nacional de Tucumán (Argentina).

Las cenizas volcánicas intercaladas en algunos de los registros sedimentarios, que han servido como elemento de correlación, fueron analizadas mediante un espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos X Niton XL3t GOLDD *Thermo Scientific* para su caracterización geoquímica. Debido a las características intrínsecas de este instrumento (no analiza sodio y los análisis no totalizan el 100%) no es posible utilizar los elementos mayoritarios de manera absoluta para la clasificación geoquímica de las cenizas estudiadas en un típico diagrama TAS (total álcalis vs sílice). Por esta razón, se emplearon como discriminantes las relaciones de elementos (Sr/Rb y K/Sr) cuyas variaciones son características para las diferentes composiciones de magmas en los Andes Centrales, siguiendo la metodología propuesta por Sola *et al.* (2016).

## Resultados y discusión

### *Dinámica fluvio-eólica actual*

El río Santa María tiene su cabecera en el valle del Cajón, donde se denomina río Colorado, y discurre de N a S hasta Punta Balasto donde gira para tomar dirección inversa, pasando a llamarse desde allí río Santa María. Debido a la aridez del clima los caudales son escasos, pero además, la alta permeabilidad del lecho hace que el agua se infiltre a lo largo de su trayectoria por el valle hasta su confluencia con el río Calchaquí, al N de Cafayate, el que aporta mayor caudal; juntos forman el río de Las Conchas a partir de

ese punto. Otra parte de su caudal se pierde al carecer de márgenes cohesivos, lo que le permite desbordes laterales en numerosos lugares, generando cauces paralelos al principal aprovechando la existencia de lechos antiguos, para volver más adelante al curso principal muy mermados de caudal o desapareciendo en la llanura aluvial. Una parte importante de los materiales en suspensión que transporta (limos, arcillas y arenas finas) queda así diseminada por una amplia extensión marginal al río. Estas zonas reciben también los aportes distales de los grandes abanicos aluviales que desarrollan las quebradas procedentes de la Sierra de Quilmes, consistentes en materiales básicamente finos, aunque en muchos casos trans-



**Figura 2.** a) Lecho fluvial del Río Santa María cerca de Tolombón; b) dunas funcionales del sector Los Médanos 2; c) duna antigua fijada por vegetación, cortada por un corredor de deflación eólica, en el sector Los Médanos 1.  
**Figure 2.** a) Fluvial bed of the Santa María River close to Tolombón; b) active dunes at Los Médanos 2; c) old dune fixed by plants and cut by an aeolian deflation corridor at Los Médanos 1 sector.

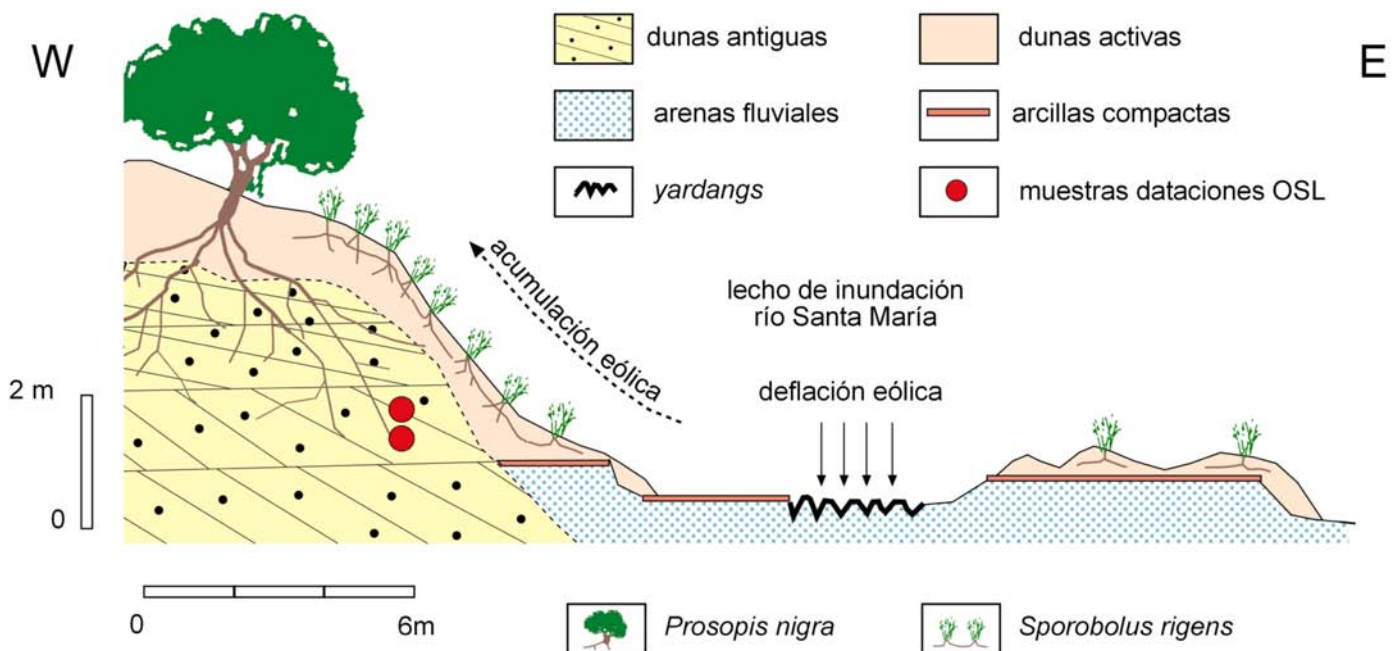
portan gravillas y gravas hasta el río principal. Este conjunto de sedimentos finos constituye la fuente de aprovisionamiento de arenas al ser movilizadas por el viento (Fig. 2a). El sedimento fluvial es retomado del cauce, generando en ocasiones profundos *yardangs* alineados en su fondo, y transportado a gran distancia, especialmente en su fracción más fina (Fig. 3). La depresión está recorrida por vientos de una gran constancia direccional, dominando los de procedencia N y NE, a veces con ráfagas que superan los 100 km/h (Peña-Monné *et al.*, 2015). La dirección está favorecida por el propio dispositivo de la cuenca y su gran capacidad de movilización se debe a la formación de torbellinos convectivos, generalmente por las tardes al calentarse la superficie del suelo.

La disposición meridiana del río Santa María favorece que los sedimentos del cauce se movilicen por acción eólica aguas arriba y hacia los márgenes cercanos. Algo similar ocurre en los cauces paralelos mencionados y en las zonas distales de los conos aluviales. Pero el efecto de activación eólica principal se produce en aquellos sectores en que el río genera meandros, exponiendo su cauce de forma transversal al viento principal; en estos casos el viento extrae del

lecho grandes cantidades de arena que son las que han conformado los principales campos de dunas del valle, como es el caso de Los Médanos del sector de Cafayate o también las dunas de El Paso3.

En momentos de crecidas importantes, el río Santa María puede avanzar puntualmente hacia los sectores distales de los abanicos aluviales, lo que genera entrantes erosivos cóncavos, cuyos escarpes alcanzan 2-4 m de alto, dándole un aspecto "aterrazado" a sus riberas. Estos escarpes posteriormente se ven sometidos a procesos de descompresión lateral y socavado basal que determinan su progresivo retroceso, acompañados de incisiones retrocedentes por *piping* debido a la dispersión del sedimento como consecuencia de su granulometría y del contenido en sodio (Na) de las sales. La mayoría de estos escarpes erosivos están orientados al sur, dada la trayectoria S-N del río, por lo que cuando hay vientos de componente sur, menos frecuentes que los de NNE, estas zonas se ven también sometidas a fuerte deflación y a la entrada de arenas formando dunas menores, como en el sector de El Paso 2.

Las dunas están en gran parte fijadas por la vegetación, aunque también hay muchas activas. Las for-



**Figura 3.** Esquema mostrando la relación entre los sedimentos fluviales del Río Santa María y el suministro de arena a las dunas funcionales, que recubren acumulaciones más antiguas, fijadas por la vegetación. En estas paleodunas se tomaron las muestras para las dataciones OSL.

**Figure 3.** Diagram showing the relationship between fluvial sediments of the Santa María River and the circulation of sand through active dunes. See how the new sand is covering the old dune. OSL samples were taken from the older part of the dunes.



mas dominantes son barjanas y cordones de barjanas, así como dunas parabólicas con vegetación (Fig. 2b). También son habituales las dunas lineales y las *nebkhas* y *rebdus* (*hummock dunes*) favorecidas por obstáculos de vegetación. Las principales alineaciones se orientan de NE a SW, excepto en el área de Tolombón, que giran a E-W y en El Paso que son claramente N-S. Estas direcciones son el resultado de los vientos dominantes adaptados a desviaciones al NE por el predominio de giros en torbellino. La vegetación que estabiliza parte de las dunas se compone de especies adaptadas a estos medios tales como *Sporobolus rigens*, asociadas con *Atriplex sp.*, *Saueda sp.*, *Gomphrena martiana* y *Heliotropium mendocinum*, todas ellas con amplio sistema radical (Hueck, 1950) (Figs. 2c, 3). En las acumulaciones más antiguas el algarrobo (*Prosopis nigra*) es la planta dominante. El impacto antrópico es muy intenso sobre las zonas de dunas, para su uso agrícola y ganadero, siendo además abundantes los incendios, la mayoría de ellos intencionados. Al ser escaso el recubrimiento vegetal, especialmente en el entorno de Cafayate, donde los viñedos han ido ocupando progresivamente el espacio, es habitual la presencia de sedimentos en suspensión en el aire, así como la activación de corredores de deflación y *blowouts* en momentos de fuertes vientos.

### **Dinámica fluvio-eólica holocena**

Gran parte del funcionamiento geomorfológico existente durante el Holoceno superior en la región debió ser similar al actual (Peña-Monné et al., 2015; Sampietro-Vattuone y Peña-Monné, 2016). Muchos de los campos de dunas están en relación con cauces antiguos, ya abandonados, dispersos por la llanura aluvial del río Santa María, obedeciendo a la misma génesis que se aprecia en la formación de las dunas actuales. Las fluctuaciones climáticas secas/húmedas y la disponibilidad de sedimento arenoso en el valle serían factores decisivos para su funcionalidad mayor o menor, pero también la acción humana en determinados momentos. Es posible reconocer sectores de dunas antiguas, bien fijadas, por el porte que alcanza la vegetación, pero sólo pueden ser bien observadas en sus características y composición cuando el viento genera corredores de deflación eólica, siendo reconocibles por sus arenas más oscuras, restos de edafización, mayor compactación y densos sistemas radicales (Figs. 2c, 3)

Para el análisis de la información paleoambiental que proporcionan estas acumulaciones fluviales y eólicas, comenzaremos con el área de mayor anti-

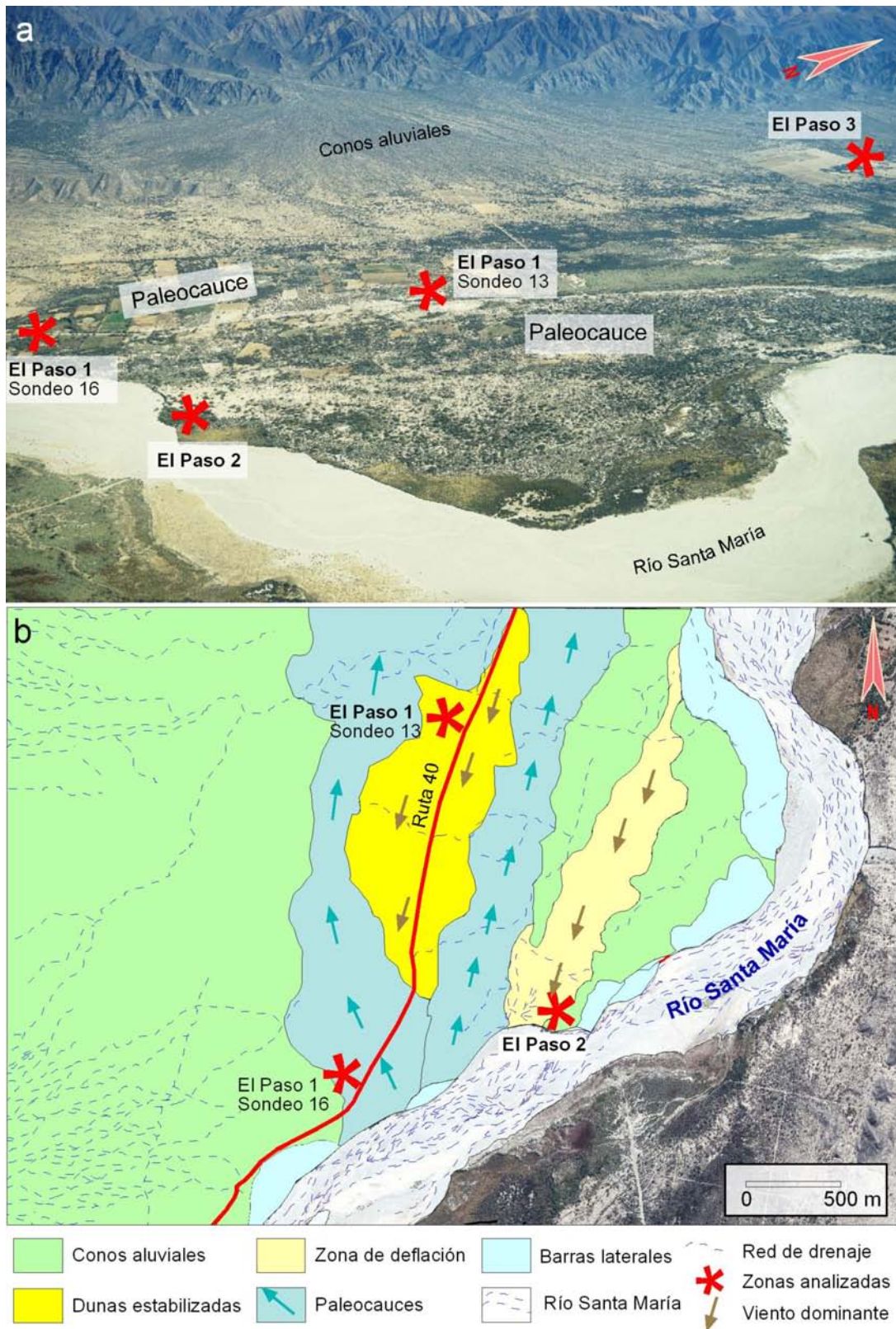
güedad de registro, el sector de El Paso, para terminar con la depresión de Cafayate, que ofrece la mejor información del último milenio.

### **Depósitos fluvio-eólicos de El Paso**

Desde el punto de vista geomorfológico, la localidad de El Paso se encuentra ubicada en el fondo del valle de Santa María (Fig. 1), en un sector de transición entre la zona distal de los abanicos aluviales con origen en la Sierra de Quilmes y la llanura de inundación del río Santa María, en su margen occidental. El curso fluvial adopta un trazado ligeramente sinuoso (Fig. 4a), mostrando además huellas de canales antiguos que pudieron ser identificados mediante la cartografía geomorfológica realizada (Fig. 4b). Estos paleocanales se extienden a lo largo de un trayecto fluvial de unos 10 km, llegando a formar una depresión paralela al río principal entre El Paso y la desembocadura del río Amaicha. Este paleocauce recoge muchos de los cursos afluentes procedentes de la Sierra de Quilmes, cuyas aguas no alcanzan directamente el río principal sino que forman un curso paralelo hasta confluir en el sector más septentrional, próximo a la localidad de Quilmes.

*El Paso 1* se localiza (Fig. 4a) en pleno núcleo de un meandro del río Santa María. El esquema geomorfológico (Fig. 4b) permite observar su ubicación en un depósito eólico situado entre paleocauces que no pueden ser considerados totalmente abandonados, ya que el río Santa María puede penetrar en ellos en momentos de crecidas importantes. El depósito eólico forma la divisoria entre estos dos surcos y su explotación para el mantenimiento de la Ruta 40 ha permitido acceder a un corte general, completado en profundidad mediante varias catas arqueológicas de las que interesan especialmente los perfiles 13 y 16 por su contenido en material cerámico correspondiente a las fases Chimpa, Bañado y Colalao del período Temprano y al período Inca (Maldonado, 2016; Maldonado et al., 2016a) y por la presencia de indicadores de valor paleoambiental.

La excavación del perfil 13 se efectuó en la zona con mejor conservación de la duna que formaba la superficie original del terreno (Fig. 5) y permite apreciar una secuencia sedimentaria de 6 m de espesor (Fig. 6a), que puede ser agrupada en tres unidades de las cuales las dos inferiores (A y B) son de origen aluvial, esencialmente de los conos laterales procedentes de la Sierra de Quilmes, mientras que la capa superior (denominada E por correlación con los demás perfiles) es plenamente eólica y fosilizó a las anteriores con una morfología dunar (Fig. 5). La uni-



**Figura 4.** a) Fotografía aérea del sector de El Paso con la situación de los puntos analizados en el trabajo y los principales componentes del paisaje; b) esquema geomorfológico del meandro de El Paso, con la ubicación de los perfiles.

**Figure 4.** a) Photograph from El Paso showing the location of analysed areas and the principal components of the landscape; b) geomorphological diagram of the meander of El Paso with profile locations.



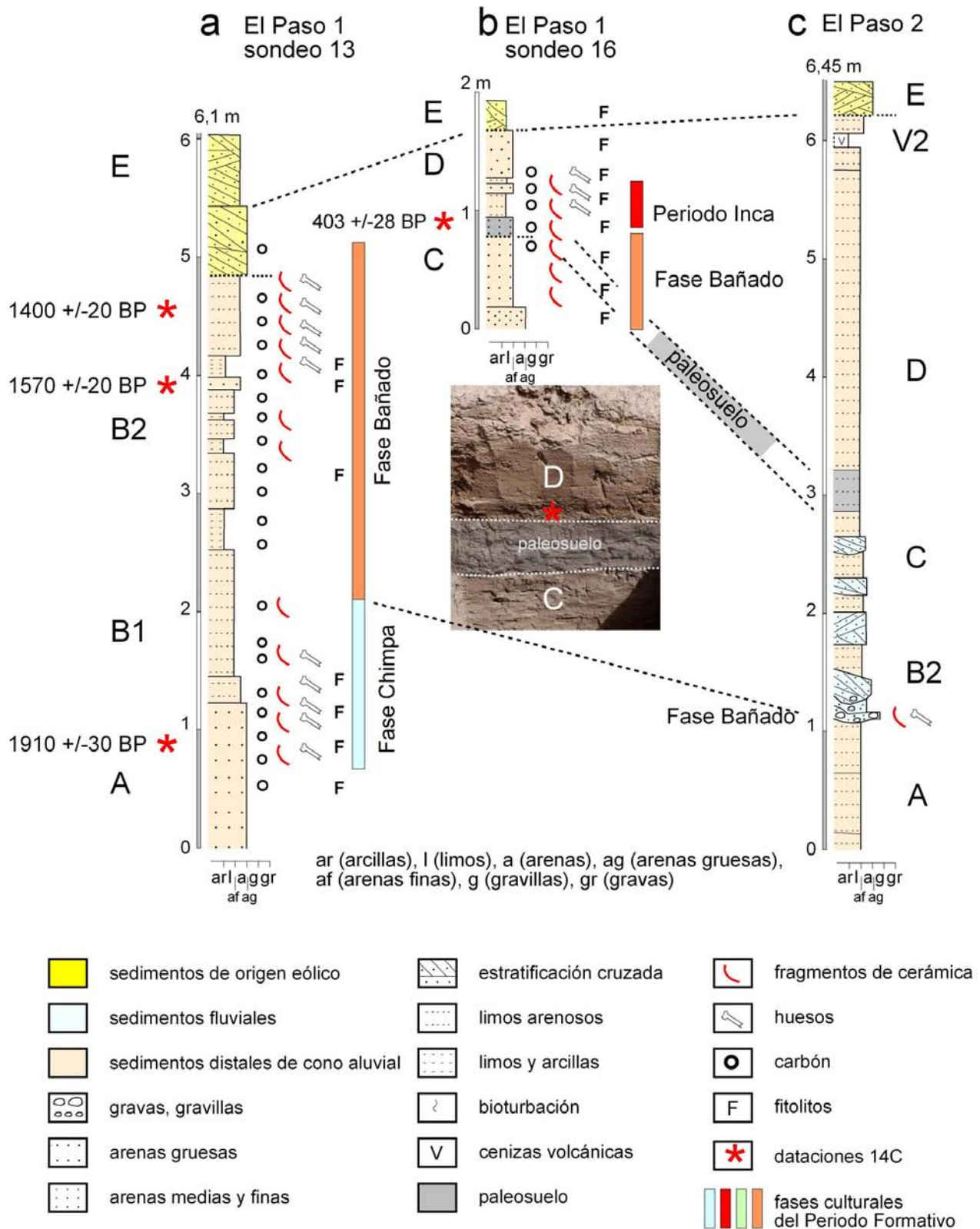
**Figura 5.** Fotografía del sondeo 13 (El Paso 1) en los inicios de su excavación. Los sedimentos del nivel B2 aparecen cubiertos por la formación eólica (E), de la que puede apreciarse su estratificación cruzada.

**Figure 5.** Photograph of probe13 starting the archaeological dig. Sediments from level B2 are covered by the aeolian formation (E), see its cross bedding.

dad A (1,35 m de espesor) se compone de arena media y gruesa masiva y un porcentaje más o menos constante de la fracción limoarcillosa. La mayor parte de los niveles contienen restos cerámicos pertenecientes a la Fase Chimpa, con abundantes restos de carbón y huesos, habiéndose obtenido una datación  $^{14}\text{C}$  de  $1910 \pm 30$  BP (1862-1746 cal BP; 88-205 cal AD) (Fig. 6a). La unidad B, subdividida en dos subunidades (B1 y B2) alcanza unos 4 m de sedimentos. B1 se compone de sedimentos más finos que la unidad A, dominando las fracciones limo-arcillosas compactas, con presencia de micro y rizoconcreciones y venillas de carbonato y prácticamente no posee materiales arqueológicos asociados; hacia el techo de B1 y en toda la subunidad B2 las concreciones carbonáticas

desaparecen y abundan los restos de ocupaciones humanas, como huesos, carbón y fragmentos cerámicos pertenecientes a la Fase Bañado (Fig. 6a). Las dos dataciones  $^{14}\text{C}$  efectuadas aportan edades de  $1570 \pm 20$  BP (1421-1371 cal BP; 529-580 cal AD) y  $1400 \pm 20$  BP (1297-1276 cal BP; 653-674 cal AD), ésta última casi a techo de la unidad. Los últimos 1,5 m corresponden al depósito eólico (unidad E), formado por arenas medias y finas, bien seleccionadas, que sólo presentan material arqueológico (Fase Bañado) en los primeros centímetros.

Para el conjunto del perfil 13, la mineralogía de los sedimentos es concordante con el material del basamento de la región (Sierra de Quilmes), donde dominan la biotita y cuarzo y se verifica la presencia de



**Figura 6.** Perfiles estratigráficos de los sectores de El Paso 1 y 2, con la situación de los principales elementos arqueológicos e indicadores paleoambientales y cronológicos: a) perfil del sondeo 13; b) perfil del sondeo 16; c) perfil de El Paso 2.  
**Figure 6.** Stratigraphic profiles of El Paso 1 and El Paso 2 areas showing main archaeological, paleoenvironmental, and chronological features; a) probe13 profile; b) probe 16 profile; c) El Paso 2 profile.

vidrio volcánico, habitual en la zona dada la presencia de depósitos de cenizas volcánicas en zonas próximas; además se identificaron feldespato potásico, plagioclasa, zircón, moscovita, piroxeno, anfíbol, granate, entre otros. El contenido fitolítico de algunos niveles incluye morfotipos de *Pooidae* y *Panicoidae*, estando los primeros representados en todas las muestras; los segundos presentan menos frecuencia. Hay otras variedades de fitolitos de gramíneas complementariamente mientras que hay pocos morfotipos no *Poaceae*.

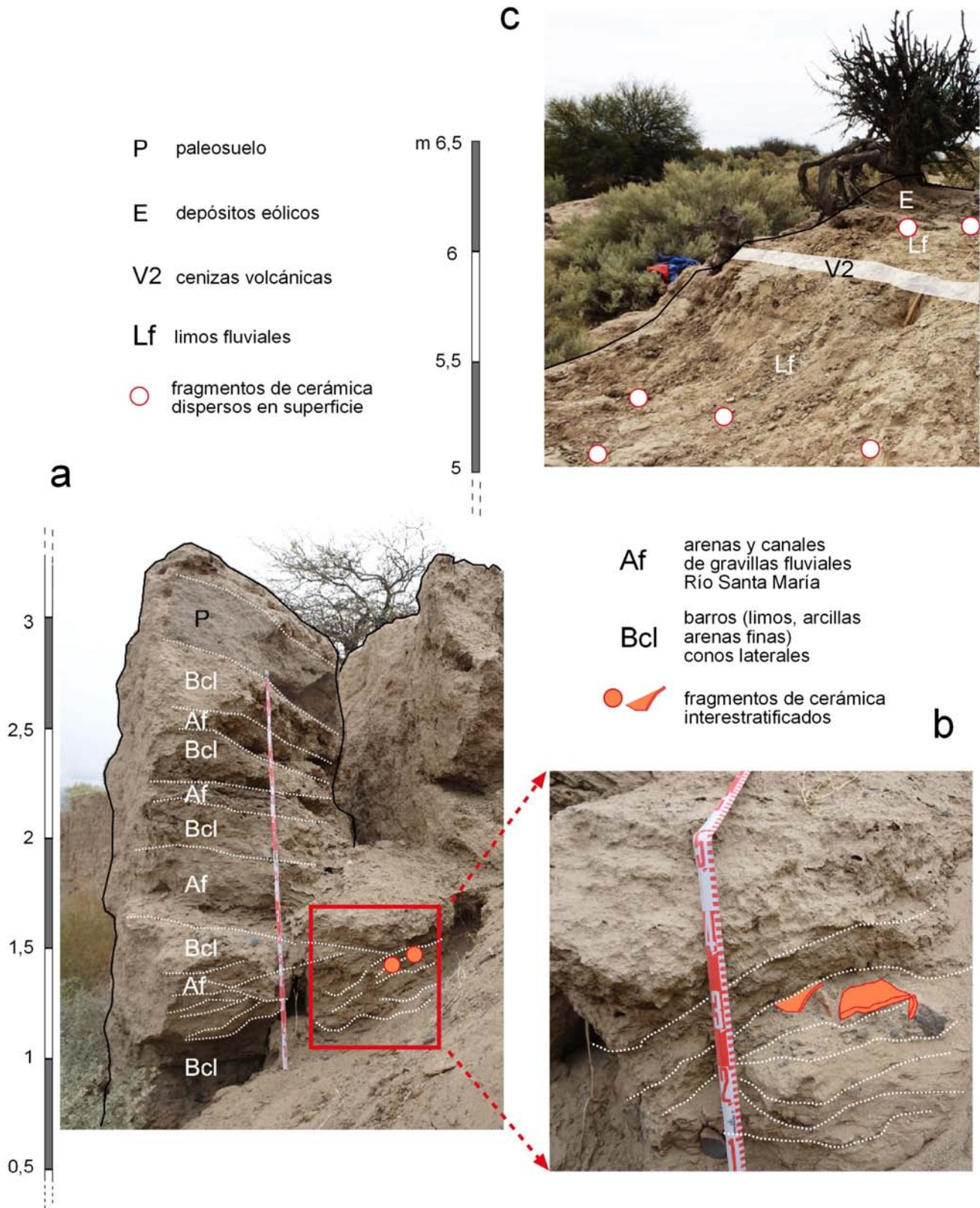
Hacia el sudoeste de este perfil se excavó el sondeo 16, que alcanzó casi 2 m de profundidad (Fig. 6b). Los materiales que componen la secuencia sedimentaria tienen la misma composición mineralógica, y la forma de los granos denota un escaso transporte predominando las formas subredondeadas. Este corte corresponde a una cronología más moderna que la del perfil 13 y pueden distinguirse dos unidades. Su base (unidad C) presenta sedimentos limoarenosos masivos, con predominio de las fracciones limo-arcilla y arena muy fina, mal seleccionada, y conteniendo materiales cerámicos de las Fases Bañado y Colalao, por lo que cronológicamente la base del perfil se superpone a la unidad B2 de la parte superior del sondeo 13. A techo se evidencia el desarrollo de un horizonte edafizado de coloración notablemente más oscura que el resto del depósito (Fig. 6b), correspondiente a un paleosuelo. En la parte intermedia del mismo se localizaron materiales arqueológicos estratificados, pertenecientes al Periodo Inca, del que se obtuvo una datación sobre hueso animal en  $403 \pm 28$  BP (490-333 cal BP; 1460-1617 cal AD). Esta edad coincide con otra establecida por Sayago *et al.* (2012) para un paleosuelo localizado también en el valle de Santa María, con una edad de  $435 \pm 15$  BP (497-468 cal BP; 1454-1482 cal AD). El perfil termina con arena muy fina con estratificación cruzada, moderadamente a bien seleccionada, de la formación dunar E, sin materiales arqueológicos (Fig. 6b). Los fitolitos son especialmente abundantes, dominando los pooides, presentes en toda la secuencia, y panicoides, representados en la parte media y superior, excepcionalmente chloridodes. También aparecen diatomeas en las capas con mayor abundancia de microfósiles.

*El Paso 2* es una secuencia estratigráfica que se localiza a 1,3 km de distancia de El Paso 1, en un corte expuesto por el río Santa María en la parte cóncava de un meandro activo (Figs. 4a, b). El avance erosivo del río ha generado un escarpe abrupto sobre el cauce de unos 3,6 m que además se prolonga más atenuado hacia el interior en otros 2,9 m (Figs. 6c, 7). La parte basal (aproximadamente 1 m) (unidad A) (Fig. 6c) se compone de sedimentos distales de cono

aluvial, dominando las arenas finas y limos bien estratificados, pero a partir de esa altura comienza una secuencia alternante de arenas y gravas fluviales con estratificación cruzada (río Santa María) y limos distales de conos hasta los 2,8 m, en que aparece un paleosuelo de unos 30-35 cm (unidad C) (Figs. 6c, 7a). La secuencia del perfil se inicia con pequeños canales de gravas, gravillas y arenas fluviales que contienen numerosos fragmentos de cerámica pertenecientes a la Fase Bañado (Figs. 7a, b), sin evidencias de transporte largo, por lo que el conjunto correspondería cronológicamente a las unidades B2 y en correlación con El Paso 1 (Fig. 6a). El paleosuelo, por su posición estratigráfica y cronológica puede asimismo ponerse en correlación con el del sondeo 16 (Fig. 6b) que fue datado en el siglo XV. Por encima del paleosuelo se inicia una sedimentación de limos arenosos masivos (unidad D), de unos 3 m de potencia, y en la que aparecen solamente algunos fragmentos cerámicos dispersos. Una capa de cenizas volcánicas de 5-10 cm se observa con gran continuidad lateral en la parte alta de este nivel (Figs. 6c, 7c), que correspondería a una erupción reciente, al menos posterior a la fecha del paleosuelo, es decir al siglo XV. En su entorno se localizaron fragmentos de cerámica del periodo Tardío. Esta ceniza es equivalente a la unidad V2 definida por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016) en el valle de Tafí. Estos autores diferencian 3 capas de cenizas volcánicas dentro de la secuencia holocena, siendo V2 la más reciente de las tres. En el valle de Tafí, su edad sería como mínimo posterior al siglo IV AD, ya que reposa sobre un yacimiento de la Cultura Tafí de dichas fechas. Por tanto, la secuencia de El Paso moderniza algo más la edad de esta etapa eruptiva. El perfil estratigráfico de El Paso 2 (Figs. 6c, 7c) finaliza con sedimentos eólicos arenosos de la Unidad E, similares a los descritos en El Paso 1, aunque en este caso en alto estado de degradación debido a la intensa actividad antrópica y a la fuerte deflación eólica. Gran parte de esta superficie aparece cubierta por restos de material cerámico, formando a veces verdaderos pavimentos debido a la deflación eólica selectiva del sedimento fino en el que estaban originalmente incluidos.

A nivel regional, esta secuencia estratigráfica, al igual que en El Paso 1, hay que incluirla en la unidad morfosedimentaria holocena H2, que abarca fechas entre ca. 4200 BP y 660 BP, establecida por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016) y Peña Monné y Sampietro-Vattuone (2016b) para el valle de Tafí y algunos sectores del valle de Santa María.

*El Paso 3* comprende un campo de dunas que se superpone a los conos aluviales del piedemonte de Quilmes, unos 5,5 km más al norte que las otras dos

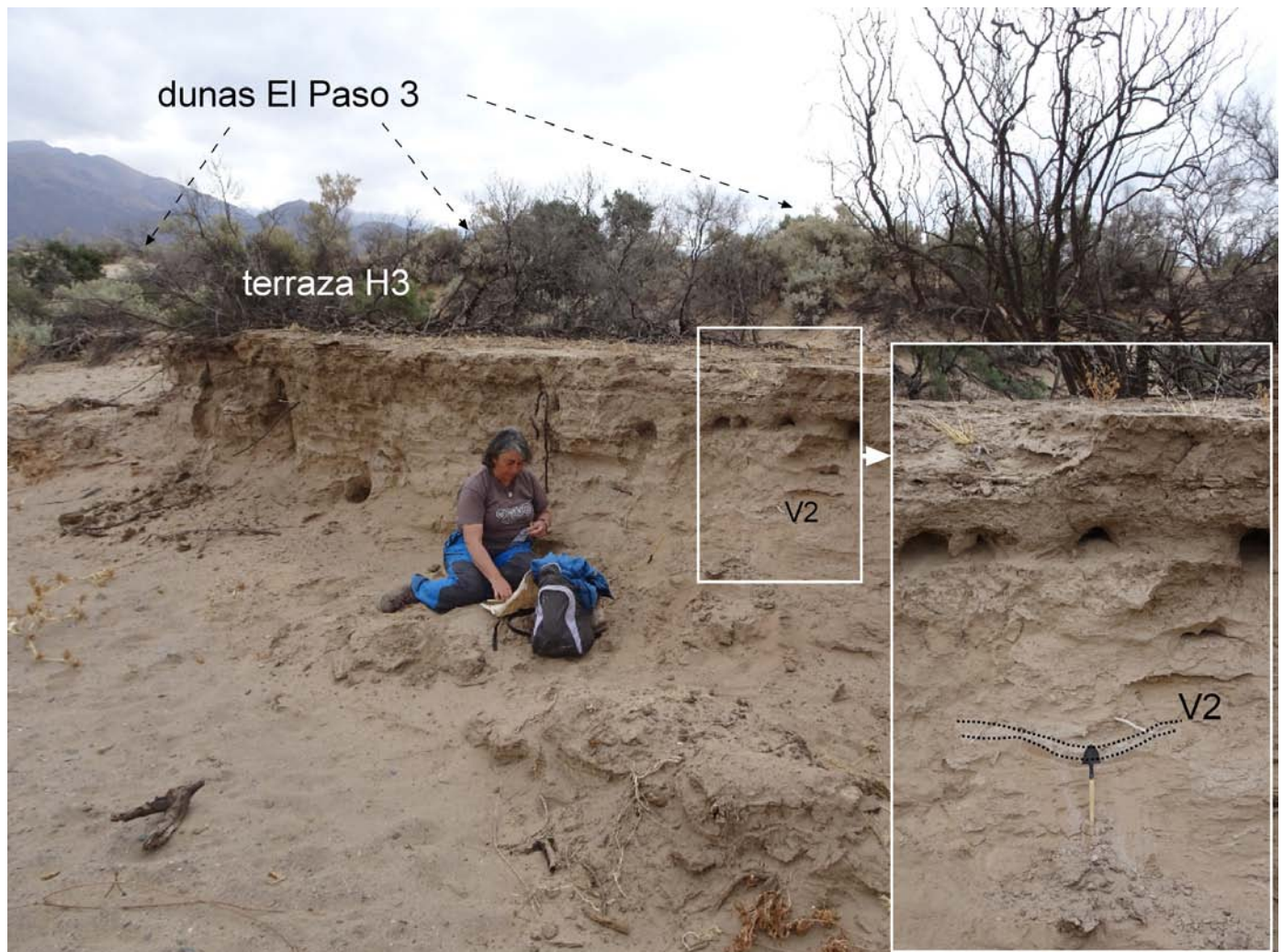


**Figura 7.** Interpretación de las unidades estratigráficas de El Paso 2: a) parte basal; b) detalle de los canales conteniendo cerámicas de la Fase Bañado; c) parte alta del depósito, con la situación del nivel de cenizas V2.  
**Figure 7.** Interpretation of the stratigraphic units at El Paso 2: a) lower section; b) detail of the channels containing ceramic potsherds of Bañado Phase; c) top section of the deposit with V2 tephras.

localidades y separado en torno a 3 km del río Santa María (Fig. 4a). Se trata de un conjunto de cordones de dunas parabólicas y algunas barjanas formando varios frentes paralelos activos desplazándose hacia el sur. Entre los cordones quedan espacios interdunares ocupados por vegetación, especialmente bosquetes de *Prosopis sp.*, que están afectados en sus márgenes más septentrionales por el avance de la arena, que los va enterrando. Originalmente estas dunas proceden de arenas suministradas por los conos y canales marginales del río Santa María en la zona cercana a Quilmes, que se han visto reactivadas a causa del fuerte impacto antrópico sobre la vegetación de la zona.

Un cauce temporal atraviesa una parte del sector dunar, procedente del piedemonte de la sierra, crean-

do un curso meandriforme. A pesar de que es invadido en muchos tramos por la arena de las dunas, es posible observar la presencia de un nivel acumulativo fluvial reciente de gran continuidad estratigráfica y unos 2 m de espesor, afectado por una incisión. Incluso hay un segundo nivel acumulativo en posición más baja (0,5 m) y con carácter muy discontinuo en algunos lóbulos de los meandros. Estas dos unidades pueden correlacionarse por criterios cronoestratigráficos con los niveles H3 (segunda mitad de la Pequeña Edad del Hielo) y H4 (época subactual) definidos por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016) y Peña-Monné y Sampietro-Vattuone (2016b), algo más al norte de este mismo piedemonte de Quilmes y en el cercano valle de Tafí. En este cauce de El Paso 3, el más alto de los dos niveles (H3) se caracteriza por la



**Figura 8.** Corte de una terraza de la etapa H3 en el campo de dunas El Paso 3. Se ha destacado el nivel de cenizas V2 que aparece intercalado en el depósito.

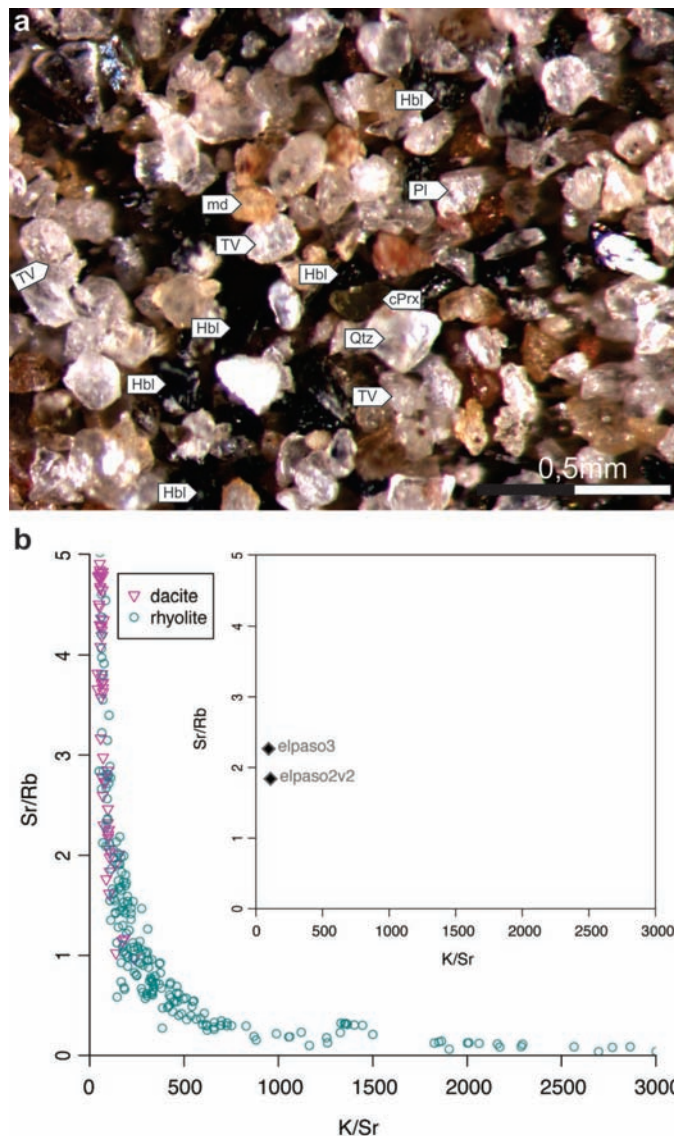
**Figure 8.** Fluvial terrace outcrop at El Paso 3, H3 stage. See V2 layer interbedded at the deposit.

presencia de una capa de cenizas volcánicas interes-  
tratificada de 6-8 cm de espesor (Fig. 8), que las asig-  
namos a la etapa V2, cuya edad estaría como mínimo  
en el siglo XV tal como hemos mencionado para el  
Paso 2. Por tanto, la incisión posterior y la acumula-  
ción del nivel inferior (H4) serían de época mucho  
más reciente, obedeciendo a fases alternantes de  
agradación e incisión en los cauces que dan lugar a  
niveles aterrazados del Holoceno reciente.

La aparición de este segundo afloramiento de  
cenizas V2 en la zona de El Paso, llevó a la necesidad  
de realizar su análisis mineralógico y geoquímico con  
la intención de verificar si tenían la misma proceden-  
cia y por tanto asegurar la asignación cronológica  
común que geomorfológicamente parecía evidente.  
Las dos muestras analizadas se caracterizan por un  
color gris claro y una granulometría de tamaño cen-  
za media y a partir del análisis con lupa binocular  
pudo apreciarse que ambas muestras están constitu-  
das por trizas vítreas subangulares (~60 %) con gra-  
dos variables de vesiculación. La fase mineral domi-  
nante es la hornblenda, constituyendo el rasgo más  
característico del depósito (Fig. 9a). En menor pro-  
porción las muestras contienen cristales de cuarzo,  
feldespatos (dominantemente plagioclasa), biotita,  
clinopiroxeno y magnetita, y en forma minoritaria de  
apatito, moscovita y rutilo. La morfología de los cris-  
tales de hornblenda, cuarzo, biotita y feldespatos  
sugiere que pertenecen al magma original fragmenta-  
do. También están presentes en el depósito algunos  
cristales y fragmentos líticos redondeados y cubiertos  
por pátinas de óxidos que representan una fracción  
detrítica. Los resultados geoquímicos obtenidos  
mediante el espectrómetro portátil de fluorescencia  
de rayos X en las muestras de cenizas volcánicas de  
la localidad El Paso (Fig. 9b) sugieren una composi-  
ción fundamentalmente dacítica para el nivel V2 lo  
cuál es consistente con la abundancia de cristales de  
hornblenda en el depósito. La presencia de estas mis-  
mas cenizas ha sido determinada también por  
Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016) en el valle  
de Tafí indicando que se trata de cenizas con una dis-  
tribución regional asociada a una erupción reciente  
de gran magnitud, aunque el centro emisor aún no ha  
sido identificado fehacientemente (Sampietro  
Vattuone *et al.*, 2017). Se confirma, por tanto, la  
misma procedencia y la asignación cronológica para  
las cenizas de El Paso 2 y El Paso 3.

### Las dunas de Cafayate

El campo de dunas de Cafayate se sitúa en el sector  
norte del valle de Santa María, a unos 60 km de El

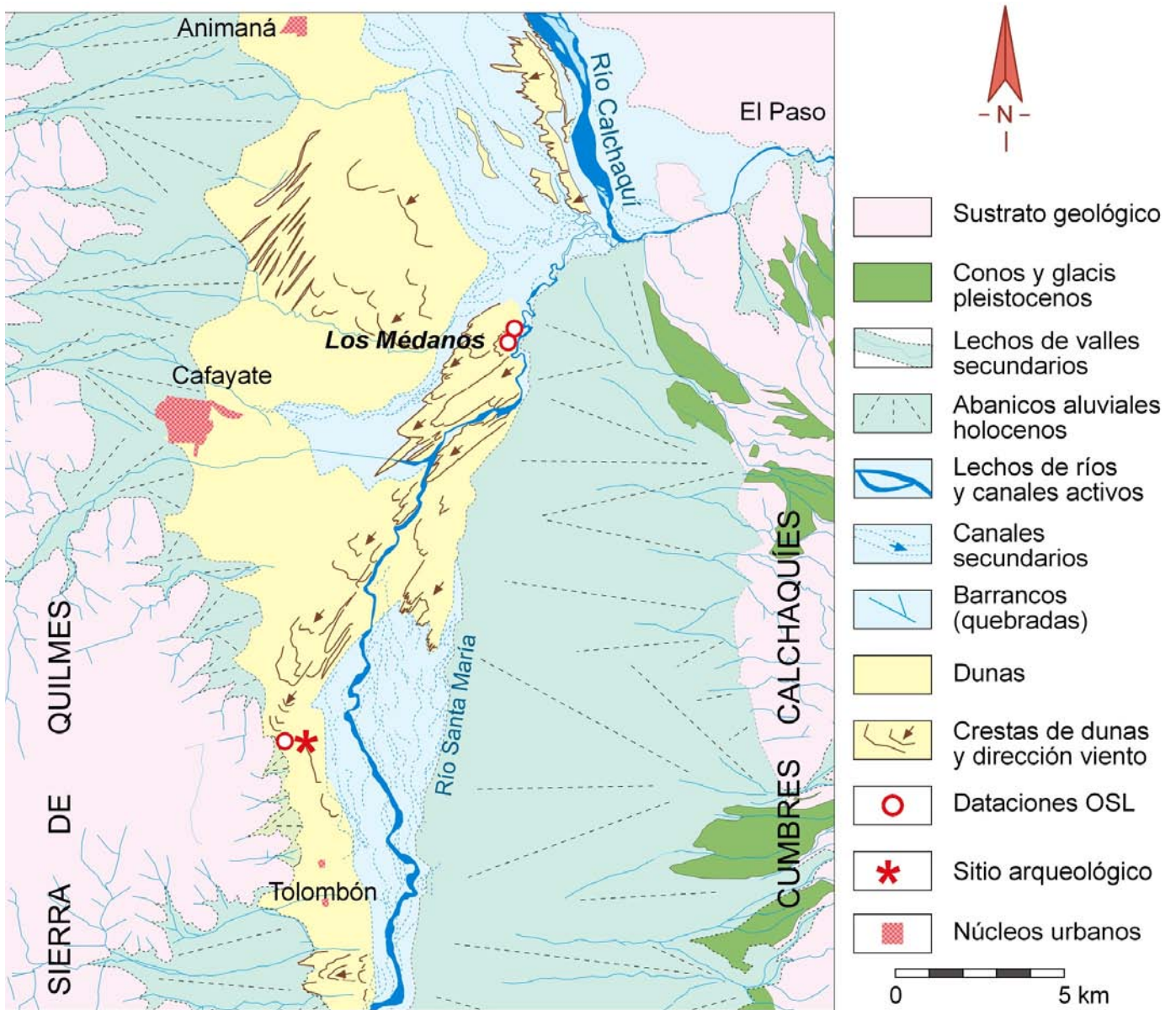


**Figura 9.** a) Fotografía con lupa binocular de cenizas V2 donde es posible apreciar la abundancia de cristales de hornblenda. TZ: trizas vítreas. md: material detrítico. Qtz: cuarzo. cPrx: clinopiroxeno. Pl: plagioclasa. Hbl: hornblenda. b) Clasificación geoquímica relativa utilizando el diagrama Sr/Rb vs K/Sr propuesto por Sola *et al.* (2016) donde se grafican las dacitas y riolitas de los Andes Centrales compiladas por Mamani *et al.* (2010) y las muestras de El Paso analizadas en este trabajo.

**Figure 9.** a) Photography with binocular magnifying glass of V2 the-  
pras where it is possible to appreciate the abundance of hornblen-  
de crystals. TZ: vitreous shreds. Md: detrital material. Qtz: quartz.  
CPrx: clinopyroxene. Pl: plagioclase. Hbl: hornblende; b) Relative  
geochemical classification using the Sr / Rbvs K / Sr using the dia-  
gram proposed by Sola *et al.* (2016) where the dacites and rhyolite-  
s of the Central Andes compiled by Mamani *et al.* (2010) are com-  
pared with those from the El Paso samples.

Paso (Fig. 1). Este sector del valle se caracteriza por  
presentar un gran ensanchamiento debido a su con-  
fluencia con el río Calchaquí. Tras la unión de los dos





**Figura 10.** Mapa geomorfológico de la depresión de Cafayate y sus campos de dunas.  
**Figure 10.** Geomorphological map of the Cafayate depression and its dune fields.

ríos, el valle se estrecha para adentrarse en profundas gargantas (río de las Conchas). Este sector, también denominado El Paso, fue afectado durante el Cuaternario por grandes deslizamientos rocosos que llegaron a cerrar el cauce y formar un gran lago que se extendió por buena parte de la depresión de Cafayate. De este evento endorreico quedan depósitos lacustres residuales dispersos por la zona, cuya edad, en los trabajos más recientes, los sitúan en el Holoceno (10.8-4.7 ka BP) (Hermanns *et al.*, 2006; Hermanns y Schellenberger, 2008). Por otra parte, el valle está bordeado por grandes abanicos aluviales

(Fig. 10), cuyos depósitos incluyen la intercalación de las cenizas volcánicas correspondientes a la fase V1 definida por Sampietro-Vattuone y Peña-Monné (2016) en el valle de Tafí, con edades de *ca.* 4200 BP.

Peña Monné *et al.* (2015, 2016a) describen dos campos dunares separados por el río Santa María, que denominan Médanos 1 y Médanos 2 (Figs. 10, 11). El primero de ellos se extiende al N del río Santa María, estando formado por dunas fijadas (Fig. 2c), pero también con áreas fuertemente activas, como en la zona de reserva "Los Médanos". También es la parte más retocada por la acción humana, debido a la pro-



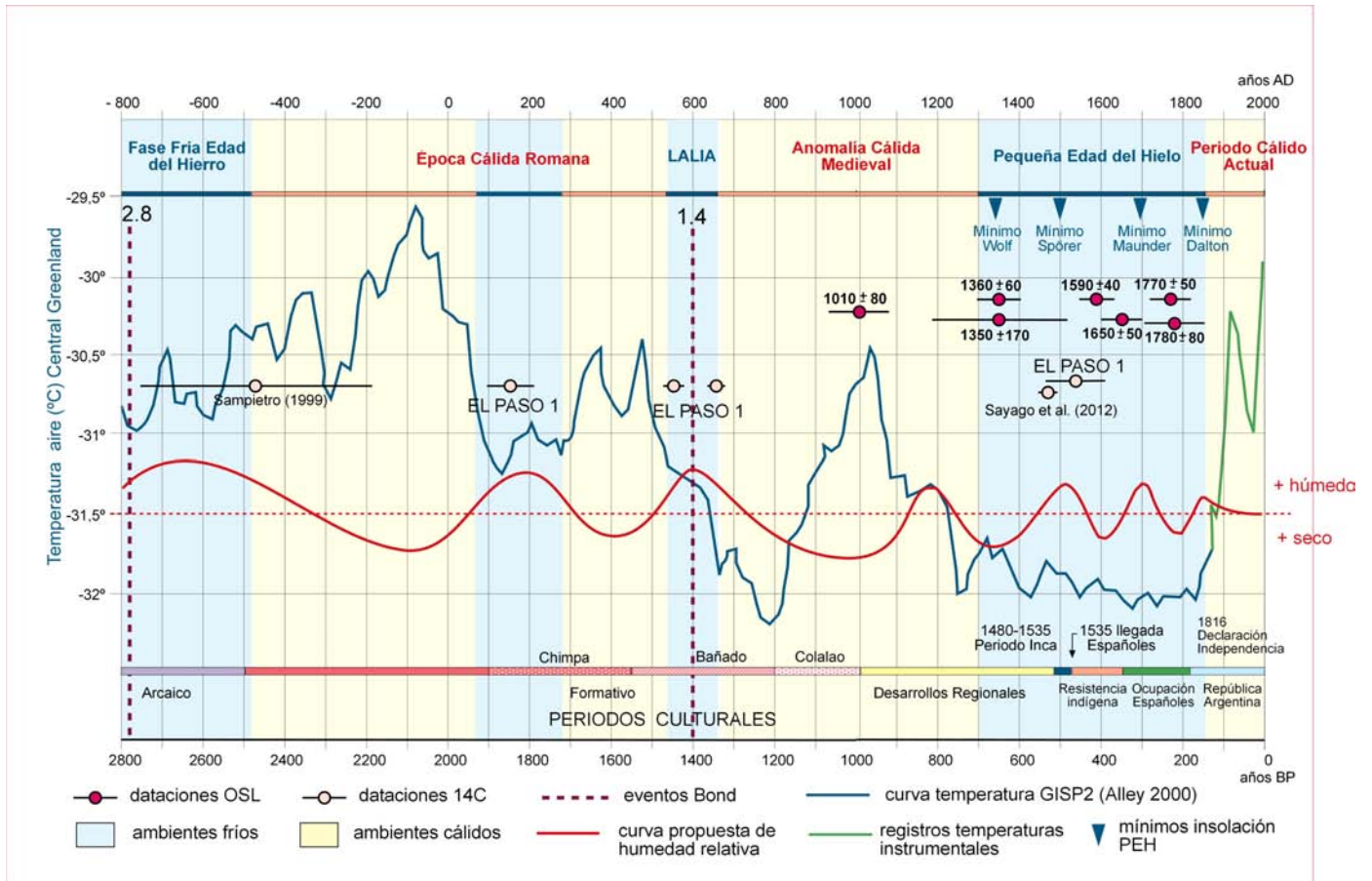
**Figura 11.** Vista aérea del valle de Santa María en el sector de Cafayate, con la situación de las dunas holocenas. El Norte está en la parte superior de la imagen.

**Figure 11.** Aerial view of the Santa María Valley at the Cafayate sector, see the Holocene dunes. The north is in the upper section of the image.

gresión de los viñedos, zonas residenciales, aeródromo, etc. Los Médanos 2 se sitúa al sur del río formando una gran campo dunar, mucho más activo (Fig. 2b), hasta el punto que llega a atravesar el cauce del río hacia el campo de golf de Cafayate y el pie de la Sierra de Quilmes (Fig. 10). En conjunto, se trata de dunas formadas por arenas de origen fluvial, con una granulometría con valores medios desde  $98$  a  $15\mu\text{m}$  y una composición mineralógica con predominio de cuarzo, feldespatos potásicos y plagioclasa, con pequeñas cantidades de filosilicatos (biotita, clorita) y algún cristal volcánico. Los granos de arena tienen formas subangulares, indicadores de escaso transporte, poca alteración química y nula cementación, por lo que se pueden relacionar con las características del sustrato

geológico del entorno (Peña-Monné *et al.*, 2015, 2016a).

Para la datación de las acumulaciones eólicas se aprovechó la aparición de buenos perfiles como consecuencia de la apertura de corredores de deflación eólica a través de dunas antiguas en un momento de fuertes vientos (Peña-Monné *et al.*, 2015). Concretamente, se pudo muestrear la zona del puente de la ruta nacional 68 (4 muestras) y las dunas entre Cafayate y Tolombón (2 muestras). Las dataciones OSL realizadas en las dunas antiguas mostraron la existencia de 4 fases de activación dunar, la primera en torno a  $1010 \pm 80$  AD, coincidente con el inicio de la Anomalía Climática Medieval; la segunda en torno a  $1350 \pm 170$  y  $1360 \pm 60$  AD, la tercera alrede-



**Figura 12.** Gráfica de reconstrucción paleoambiental desde 2,800 BP del valle de Santa María.  
**Figure 12.** Paleoenvironmental reconstruction since 2,800 BP from the Santa María Valley.

dor de  $1590 \pm 40$  -  $1650 \pm 50$  AD y finalmente la cuarta en torno a  $1770 \pm 50$  y  $1780 \pm 80$  AD, éstas tres últimas durante el periodo de las fluctuaciones de la Pequeña Edad del Hielo (Fig. 12). Por otra parte, en las dunas cercanas a la carretera de Tolombón también se localizaron cerámicas del período Temprano final en el mismo corredor en que se realizó la datación de ca. 1360 AD, correspondientes a un yacimiento *in situ* que fue recubierto por esta fase de activación eólica.

### Reconstrucción paleoambiental del valle de Santa María

A partir de la interpretación paleoambiental y de los datos cronológicos de las secuencias morfosedimentarias localizadas en El Paso y Cafayate es posible realizar una aproximación a la reconstrucción paleoambiental del valle de Santa María, que podemos iniciar en ca. 2500-2800 BP y prolongarlo hasta la actualidad.

En la Fig. 12 se han situado como información básica las fases climáticas globales del Holoceno para los últimos 2800 años, acompañados de los dos eventos Bond (Bond *et al.*, 1997) que afectan a este periodo temporal, la parte de la curva GISP2 de paleotemperaturas (Alley, 2000) y su prolongación durante el periodo de registro instrumental. Igualmente se ha dispuesto la división en Periodos Culturales para la región. Cronológicamente se han utilizado las dataciones 14C del sector de El Paso (Maldonado, 2016) y las dataciones OSL de las dunas de Cafayate (Peña-Monné *et al.*, 2015, 2016a), así como otras dataciones existentes (Sampietro Vattuone, 1999; Sayago *et al.*, 2012). Igualmente, se ha trazado una gráfica tentativa de los cambios en la humedad inferidos a partir de los datos geomorfológicos, estratigráficos, edafológicos y arqueológicos expuestos. A falta de una terminología local en la división climática, se ha utilizado la correspondiente al Hemisferio N Europeo, que en la mayor parte de los casos son de ámbito global.

En la evolución del Holoceno superior, a nivel regional se conoce la existencia de un fase favorable a la formación de suelos, en torno a *ca.* 2800-2500 BP, que dió lugar a los paleosuelos más importantes del cercano valle de Tafí, definidos y datados por Sampietro Vattuone (1999) en  $2480 \pm 110$  BP (2760-2188 cal BP) y muy generalizado en el citado valle (Peña-Monné y Sampietro Vattuone, 2016b) donde se asentaron las comunidades de la Cultura Tafí (Sampietro Vattuone, 2010; Roldán, 2014). Esta fase de pedogénesis tuvo lugar en una fase climática más húmeda y fría, conocida a nivel global como Fase Fría de la Edad del Hierro (2.8-2.6 ka BP, Wanner *et al.*, 2011), correspondiente al evento Bond 2.8 (Bond *et al.*, 1997). Esta fase fría se evidencia en la gráfica de Alley (2000) del sondeo GISP2 (Fig. 12). A partir de esta etapa comienza un progresivo calentamiento acompañado de descenso en la humedad (Época Romana en Europa) que perduró hasta la LALIA (*Late Antique Little Ice Age*). La Fase Fría de la Edad del Hierro se corresponde cronológicamente en la región con el inicio del Periodo Formativo a nivel cultural. Pero puede diferenciarse dentro de este periodo una fase intermedia más húmeda y fría, que coincide con grandes migraciones de pueblos del Norte en Europa, cuya duración aproximada es de *ca.* 80-280 AD (Fig. 12). Este periodo de mayor humedad relativa se corresponde en el valle de Santa María con la Fase Chimpa del Formativo y con el inicio (nivel A) de la secuencia sedimentaria de El Paso 1, en el que se sitúa la datación de  $1910 \pm 30$  BP (1862-1746 cal BP; 88-205 cal AD) (Figs. 6a, 12). Las otras dos dataciones del sondeo 13 ( $1570 \pm 20$  BP (1421-1371 cal BP; 529-580 cal AD) y  $1400 \pm 20$  BP (1297-1276 cal BP; 653-674 cal AD) caen de pleno en el periodo frío de LALIA (Fig. 12), definida cronológicamente por Büntgen *et al.* (2016) en 536-660 cal AD, equivalente a la DACP (*Dark Age Cold Period*; 509-565 AD de Helama *et al.*, 2017) y que tiene carácter global (evento Bond 1.4). En este caso correspondería a la secuencia registrada en el nivel B2 de El Paso 1 (Fig. 6a) con abundantes restos de ocupación pertenecientes a la Fase Bañado, al igual que las cerámicas de esta misma etapa que aparecen en el nivel B2 de El Paso 2 (Figs. 6c, 7a, b).

Los niveles C del sondeo 16 de El Paso 1 y de El Paso 2 seguramente son los escasos testimonios del largo periodo cálido correspondiente a la Anomalía Cálida Medieval (Fig. 12). Todo parece indicar que estos momentos son de predominio de la erosión, de manera que algunas secuencias aparecen truncadas, como ocurre en el sondeo 13. En este periodo temporal, considerado muy seco en la mayor parte de las reconstrucciones paleoambientales del Noroeste Argentino (Kulemeyer *et al.*, 2013; Grana *et al.*, 2016),

se localiza la datación de activación dunar más antigua de las localizadas en Cafayate ( $1010 \pm 80$  BP); por otra parte, en estas fechas, que corresponden al momento álgido del calentamiento según la gráfica de Alley (2000), se produjo el final de las culturas del Formativo y el inicio de los Desarrollos Regionales (Fig. 12).

En plena Pequeña Edad del Hielo, en condiciones climáticas más frías (Alley, 2000), las dataciones OSL de las dunas de Cafayate nos muestran 3 fases de reactivación que podemos simplificar a partir de su valor central en *ca.* 1350, *ca.* 1650 y *ca.* 1770, relacionados con fases más secas, aunque para este periodo de alta variabilidad climática y aumento de la actividad antrópica es más difícil llegar a conclusiones paleoambientales. Entre estos picos relativamente secos, debieran situarse fluctuaciones relativamente más húmedas (Peña-Monné *et al.*, 2015), la más evidente de las cuales está en el espacio temporal entre las fases secas de 1350 y 1650, ya que en este momento se sitúa la datación de un paleosuelo, obtenida en el valle de Santa María por Sayago *et al.* (2012) en 1454-1482 cal AD así como la datación del paleosuelo del sondeo 16 (Fig. 6b), que es de 1460-1617 cal AD. (Fig. 12). Por otra parte, la existencia de registros documentales históricos de sequías e inundaciones en el norte argentino (López de Albornoz, 1997; Prieto *et al.*, 2000; Herrera *et al.*, 2003, Prieto y Herrera, 2009) también han permitido corroborar tanto las fases secas de reactivación dunar como los periodos de mayor pluviosidad intermedios, tal como se recoge en Peña-Monné *et al.* (2015). Hay una coincidencia entre estas fases de mayor humedad disponible con los Mínimos de insolación de la Pequeña Edad del Hielo, especialmente entre los Mínimos Spörer, Maunder y Dalton que encajan en los espacios relativamente más húmedos situados entre las fases de reactivación dunar. Únicamente, el Mínimo Wolf coincide directamente con una fase seca y de funcionamiento eólico (Fig. 12). A partir del Periodo Cálido Actual, desde mediados del siglo XIX, los registros instrumentales permiten conocer las condiciones de sequedad y temperaturas altas que caracterizan esta fase así como el nivel de activación de las dunas, muy condicionado también por la influencia antrópica.

## Conclusiones

Los sectores de El Paso y Cafayate reúnen importante información sobre la evolución de paleoambientes y ocupación humana representativos del valle de Santa María. La realización de estudios geomorfoló-

gicos, estratigráficos y geoarqueológicos en acumulaciones fluvio-eólicas, acompañados de cartografía geomorfológica y realización de dataciones  $^{14}\text{C}$  y de OSL han permitido una aproximación reconstructiva a los paleoambientes de los últimos 2800 años.

La localidad de El Paso ha proporcionado los datos más antiguos. La fase húmeda de ca. 2800-2500 BP favoreció el desarrollo de un importante paleosuelo a nivel regional, sobre el que se asentaron numerosas culturas del Periodo Formativo. Esta etapa, equivalente cronológicamente en su primera mitad (2500-1500 BP) con la Fase Cálida Romana en Europa, determinó un empeoramiento climático, que se recuperará en la oscilación intermedia a condiciones más húmedas y frías, durante la Fase Chimpa. Igualmente, en esta misma localidad, se ha datado la siguiente fase fría y húmeda (LALIA) que coincide con la ocupación de la Fase Bañado, siendo un evento de carácter global. Desde ese momento y a lo largo de la Anomalía Cálida Medieval, de nuevo se repite otra importante fase seca y cálida, que en los registros morfosedimentarios de los valles tiene características erosivas. Esta etapa está representada en las dunas de Cafayate con una primera reactivación dunar en torno al año 1000 AD.

Para el último milenio, los datos paleoambientales más notables son los que proceden de dataciones OSL en las dunas antiguas de Cafayate, distinguiéndose tres fases de reactivación en torno a los siglos XIV, XVII y XVIII, durante la Pequeña Edad del Hielo. Estas fases relativamente secas, estuvieron separadas por fluctuaciones más húmedas que llegaron a favorecer momentos de estabilización ambiental, como en el caso del intervalo entre las fases 1350 y 1650, identificándose un suelo de esta época en El Paso 1 y El Paso 2. Las fluctuaciones de humedad más recientes también han sido identificadas a nivel documental en el Noroeste Argentino. Tres de las anomalías en la insolación (Mínimos Spörer, Maunder y Dalton) aparecen relacionadas con los periodos húmedos entre reactivaciones dunares desde el siglo XVI a inicios del XIX.

Llama la atención la relación observada entre los periodos fríos/húmedos a nivel global y la presencia de grandes momentos de ocupación en el fondo de valle, especialmente cuando además hay un desarrollo de suelos y fijación de las dunas por la vegetación. Es el caso de las Fases Chimpa y Bañado y también la llegada Inca a la región. Esta relación también ha sido descrita en el valle de Tafí en relación con el desarrollo de la Cultura Tafí tras la formación del paleosuelo en torno a 2800-2500 BP. En muchos casos, el deterioro posterior por derivas climáticas hacia condiciones más secas o incluso al deterioro ambiental pro-

ducido por la actividad humana (como ha sido indicado a mediados del siglo XVIII) debió generar abandonos de determinadas zonas de asentamiento, que incluso desaparecerían bajo la arena de las dunas reactivadas.

## Agradecimientos

Trabajo realizado en el ámbito del Grupo de Investigación Paleoambientes del Cuaternario (PALEOQ) del Gobierno de Aragón y Fondo Europeo de Desarrollo Regional. También con ayudas de CONICET Proyecto Cooperación Internacional R996 Profesores invitados; Programa Ibercaja-CAI Estancias Investigación CH12/15; Proyecto MINECO HAR2015-65620-P; Proyecto PIUNT G629.

## Referencias

- Alley, R.B. 2000. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Review*, 19, 213-226.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278, 1257-1266.
- Bossi, G.E., Georgieff, S.M., Gavrilloff, I.J.C, Ibáñez, L.M. and 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.
- Büntgen, U., Myglan, V.S., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., Jungclaus, J., Wagner, S., Krusic, P.J., Esper, J., Kaplan, J.O., De Vaan, M.A.C., Luterbacher, J., Wacker, L., Tegel, W. and Kirilyanov, A.V. 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, 9, 231-236.
- Caggiano, M.A. and Sempe, M.C. 1994. *América, prehistoria y geopolítica*. Editorial Tea. Buenos Aires, 432 pp.
- Cortelezzi, C.R., Pavlicevic, R.E. and Rivelli, F.R. 1984. Estudio sedimentológico de las arenas de las dunas de Cafayate, Provincia de Salta, República Argentina. *Geociencias*, 3, 47-56.
- Faust, D., Zeilhofer, C., Baena-Escudero, R. and Díaz del Olmo, F. 2004. High-resolution fluvial record of late Holocene geomorphic change in northern Tunisia: Climate or human impact? *Quaternary Science Reviews*, 23, 1757-1775.
- Forman, S.L., Goets, A.F.H. and 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, 30 pp.
- Grana, L., Tchilinguirian, P., Olivera, D.E., Laprida, C., and Maidana, N.I. 2016. Síntesis paleoambiental en Antofagasta de la Sierra: heterogeneidad ambiental y ocupaciones humanas en los últimos 7200 años cal AP. *Intersecciones en Antropología*, 17(2), 19-32.
- Greco, M.C. 2012. *Integración de datos arqueológicos, radiocarbónicos y geofísicos para la construcción de una cronología de Yocavil y alrededores*. Tesis de Doctorado, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires., 340 pp.
- Hanson, P.R., Joeckel, R.M., Young, A.R. and Horn, J. 2009. Late Holocene dune activity in the Eastern Platte River valley, Nebraska. *Geomorphology*, 103, 555-561.
- Helama, S., Jones, P.D., Briffa, K.R. 2017. Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research. *The Holocene*, 1, 7.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., Villanueva García, A. and 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, In: Evans, S.G., Scarascia, G., Strom, A.L. and Hermanns, R.L. (eds.) *Massive rock slope failure: new models for Hazard assessment*. NATO Science series 4 Earth and Environmental Sciences, Springer, Berlin, 497-520.
- Hermanns, R.L. and Schellenberger, A. 2008. Quaternary tephrochronology helps define conditioning factors and triggering mechanisms of rock avalanches in NW Argentina. *Quaternary International*, 178, 261-275.
- Herrera, R.G., Prieto, M.R. and García-Herrera, R. 2003. Floods in the semiarid Argentinean Chaco during the 17th to 19th centuries, In: Thorndycraft, V.R., Benito, G., Barrientos, M. and Llasat, M. (eds.) *Proceedings of Palaeofloods, Historical Data & Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment*. CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid, 107-112.
- Hueck, K., 1950. Estudio ecológico y fitosociológico de los médanos de Cafayate (Salta). *Lilloa*, 23, 63-115.
- Kulemeyer, J., Lupo, L., Madozzo, C., Cruz, A., Pignoni, M., Cuenya, P., Cortes, R., and Korstanje, A. 2013. Desarrollo del Paisaje Holoceno en la Cuenca de El Bolsón, Catamarca: 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.
- 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. In: García Acosta, V. (Ed.) *Historia y Desastres en América Latina 2*, 163-190.
- Maldonado, M.G. 2016. *Cambios en la apropiación del espacio durante el período agroalfarero prehispánico en la ladera oriental de Sierra de Quilmes (Tucumán, Argentina)*. Tesis doctoral Universidad Nacional de La Plata, 420 pp.
- Maldonado, M.G., Sampietro Vattuone, M.M., Blasi, A.M., Castiñeira Latorre, C., Peña Monné, J.L. and Pignoni, M.A. 2016a. Estratigrafía, paleoambiente y procesos de formación de sitio en El Paso durante el Holoceno Tardío (valle de Santa María-Noroeste Argentino). In: Sampietro Vattuone, M.M. and Peña Monné, J.L. (eds.) *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*. Laboratorio de Geoarqueología, Universidad Nacional de Tucumán, 121-144.
- Maldonado, M.G., Sampietro Vattuone, M.M., Blasi, A.M., Roldán, J., Draganits, E. and Cordero, A.J. 2016b. Patrones de ocupación regional prehispánicos (ca. 100-1535 AD) en la vertiente oriental de la sierra de Quilmes (Noroeste Argentino). In: Sampietro Vattuone, M.M. and Peña Monné, J.L. (eds.), *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*. Laboratorio de Geoarqueología. Universidad Nacional de Tucumán, 89-120.
- Mamani, M., Wörner, G. and Sempere, T. 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 122, 162-182.
- Mendoza, E.A. 2005. El clima y la vegetación natural. In: Minetti, J.L. (Ed.), *El clima del Noroeste argentino*. Editorial Magna, San Miguel de Tucumán, 267-319.
- Minetti, J.L., Poblete, A.G. and Longhi, F. 2005. Los mesoclimas del Noroeste Argentino. In: Minetti, J.L. (ed.) *El clima del Noroeste argentino*, Editorial Magna, San Miguel de Tucumán, 217-233.
- Muhs, D.R. 1985. Age and paleoclimatic significance of Holocene sands dunes in northeastern Colorado. *American Association of Geographers Annals*, 75, 556-582.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G. 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37, 377-381.
- Osácar, M.C., Sancho, C., Peña-Monné, J.L., García, R. and 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., Osácar-Soriano, M.C., Rubio-Fernández, V. and 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., Maldonado, M.G., Cano, S.F. and Aguirre, M.G. 2016b. Contexto geomorfológico y problemas de conservación en el sitio arqueológico El Pichao (Valle de Santa María, Noroeste Argentino). In: Sampietro Vattuone, M.M. and Peña Monné, J.L. (eds.) *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*. Laboratorio de Geoarqueología, Universidad Nacional de Tucumán, 165-184.
- Peña Monné, J.L., Sancho Marcén, C., Sampietro Vattuone, M.M., Rivelli, F., Rhodes, E., Osácar Soriano, M.C., Rubio Fernández, V. and García Giménez, R. 2016a. Geomorfología y cambios ambientales en la depresión de Cafayate (Prov. de Salta, Noroeste Argentino). In: Sampietro Vattuone, M.M. and Peña Monné, J.L. (eds.) *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*. Laboratorio de Geoarqueología, Universidad Nacional de Tucumán, 213-242.

- Peña-Monné, J.L. and Sampietro Vattuone, M.M. 2016a. Geomorphology of the alluvial fans in Colalao del Valle-Quilmes area (Santa María Valley, Tucumán Province, Argentina). *Journal of Maps*, 1-6.
- Peña Monné, J.L., and Sampietro Vattuone, M.M. 2016b. La secuencia paleoambiental holocena de la vertiente oriental de Loma Pelada (Valle de Tafí, Noroeste Argentino): cambios climáticos y acción humana). In: Sampietro Vattuone, M.M. and Peña Monné, J.L. (eds.) *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes*. Laboratorio de Geoarqueología Universidad Nacional de Tucumán, 23-64.
- Perea, M.C. 1995. Mapa de vegetación del Valle de Santa María, sector oriental (Tucumán, Argentina), *Lilloa*, 38(2), 16-32.
- Prieto, M.R. and García Herrera, R. 2009. Documentary sources from South America: Potential for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281, 196-209
- Prieto, M.R., Herrera, R., and Dussel, P. 2000. Archival evidence for some aspects of historical climate variability in Argentina and Bolivia during the 17th and 18th centuries. In: Smolka, P. and Volkheimer, W. (eds.) *Southern Hemisphere Paleo- and Neoclimates*. Springer, 127-142.
- Roldán, J. 2014. *Agricultura y geoquímica de suelos prehispánicos en Valles Calchaquíes. Tucumán. Argentina*. Tesis Doctoral. Repositorio Documental Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. <http://www.repositorio.unt.edu.ar/handle/11327/131>
- 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), 30-31.
- 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. and Peña-Monné, J.L. 2016. Geomorphological dynamic changes during the Holocene through ephemeral stream analyses from Northwest Argentina. *Catena*, 147, 663-677.
- Sampietro Vattuone, M. M., Sola, A., Báez, W.A. and Peña Monné, J.L. 2017. Aplicación de la correlación geoquímica de niveles cineríticos en la reconstrucción de las secuencias morfosedimentarias holocenas del valle de Tafí. *XX Congreso Geológico Nacional*, Tucumán, S10, 67-72.
- Sancho, C., Peña, J.L., Muñoz, A., Benito, G., McDonald, E., Rhodes, E.J. and Longares, L.A. 2008. Holocene alluvial morphopedosedimentary record and environmental changes in the Bardenas Reales Natural Park (NE Spain). *Catena*, 73, 225-238.
- Sayago, J. M., Collantes, M.M. and Niz, A. 2012. El umbral de resiliencia del paisaje en el proceso de desertificación de los valles preandinos de Catamarca (Argentina). *Acta Geológica Lilloana*, 24 (1-2), 62-79.
- Scattolin, M. C. 2007. Santa María antes del año mil. Fechas y materiales para una historia cultural. In: Williams, V.I., Ventura, B.N., Callegari, A.B.M. and Yacobaccio, H.D. (eds.), *Sociedades Precolombinas Surandinas. Temporalidad, Interacción y Dinámica Cultural del NOA en el Ámbito de los Andes Centro-Sur*, Taller Internacional de Arqueología del NOA y Andes Centro Sur. Buenos Aires, pp. 203-220.
- Sola, A.M., Baez, W.A., Bustos, E., Hernandez, R., Sampietro Vattuone, M.M., Peña Monné, J.L. and Becchio, R.A. 2016. Cluster analysis using portable X ray fluorescence (pXRF) data: a fast and powerful method for regional correlation of ash fall deposits. Puerto Varas, Chile, *Actas del Cities on Volcanoes 9*.
- Tarragó, M.N. 1987. Sociedad y sistema de asentamiento en Yocavil. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología*, 12, 179-196.
- Thomas, D.S.G. 2013. Aeolian palaeoenvironments of desert landscapes. In: Shroder, J.F. (ed.), *Teatrise on Geomorphology, 11: Aeolian Geomorphology*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 356-374.
- Toselli, A.T., Rossi, J.N. and Rapela, C.W. 1978. El basamento metamórfico de la Sierra de Quilmes (República Argentina). *RAGA*, 33(2), 105-121.
- Tripaldi, A. and Forman, S.L. 2007. Geomorphology and chronology of Late Quaternary dune fields of western Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 251, 300-320.
- Tripaldi, A., Zárate, M.A., Forman, S.L., Badger, T., Doyle, M.E. and Cicioli, P. 2013. Geological evidence for a drought episode in the Western Pampas (Argentina, South America) during the early-mid 20th century. *The Holocene*, 23(12), 1731-1746.
- Waters, M.R. and Haynes, C.V. 2001. Late Quaternary arroyo formation and climate change in the American Southwest. *Geology*, 29, 399-402.

Recibido: junio 2017

Revisado: diciembre 2017

Aceptado: febrero 2018

Publicado: diciembre 2018

