



# Análisis de la variabilidad del colapso y su geología en un perfil de loess

## Collapse variability analysis and its geology in a loess profile

Rouzaut Sabrina<sup>1</sup> ✉ - Clariá, Juan José<sup>2</sup> - Curto, Joel<sup>1</sup>

Recibido: 15 de septiembre de 2021 • Aceptado: 15 de febrero de 2022

### Resumen

*Las valiosas y numerosas pérdidas por daños sobre estructuras civiles que los loess cordobeses han producido como consecuencia de su susceptibilidad al colapso han motivado numerosas investigaciones en el medio local. Si bien los loess cordobeses presentan un origen, granulometría y mineralogía común a lo largo de todo el territorio de la provincia, existen notables diferencias en cuanto a su potencial de colapso consecuencia los distintos procesos geológicos bajo los cuales estuvieron sometidos. Con el objeto de vincular el comportamiento mecánico con la historia geológica, se estudió un perfil estratigráfico ubicado en la localidad de Corralito, que consiste en una secuencia de loess-paleosuelo que aflora en una cárcava de 14 m de profundidad. A tal fin, se tomaron 33 de muestras a lo largo de todo el perfil, compuesto por un horizonte superior antrópico, un horizonte orgánico, un manto de loess superior, y finalmente en profundidad los loess inferiores I, II y III, sobre las que se realizaron en laboratorio ensayos de doble edómetro. Los resultados mostraron que las muestras de los horizontes antropizados, orgánico y loess superior, correspondientes a loess primarios o bien con presencia de materia orgánica, resultan altamente colapsables. Sin embargo, las muestras de los loess inferiores I y III no resultan susceptibles al colapso por humedecimiento. La diferencia de comportamiento entre los diferentes estratos, es explicada en función de los procesos sufridos por los mismos a lo largo de su historia geológica. La estabilidad mecánica de los loess inferiores se atribuyó a que estos horizontes corresponden a un fragipán y a un posible horizonte cementado con carbonato de calcio respectivamente.*

**Palabras clave:** loess, colapso, historia geológica, tosca, Corralito.

### Abstract

*The valuable and numerous damages on civil structures that loessial soils from the city of Cordoba have generated because of their collapse susceptibility have been extensively studied by many local researchers. Although every loess has similar origin, mineralogy and grain size distribution, not all loess became collapsible due to their different geological processes. In order*

<sup>1</sup> Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

✉ srouzaut@unc.edu.ar

<sup>2</sup> Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba

to quantify this mechanical instability phenomenon and link this behavior to the geological history of loessial soils, a stratigraphic profile located at Corralito, was studied. This lithologic profile consists of a loess-paleosol sequence that emerges in a 14 m deep naturally open trench, composed of an anthropic upper horizon, followed by an organic horizon, then a mantle of upper loess, and finally in depth, the lower loess I, II and III. Thirty-three undisturbed soil samples were taken along these 14 m profile and laboratory double oedometer tests were carried out. The test results showed that specimens from the anthropic, organic, and upper loess are highly collapsible. Nevertheless, the collapsibility coefficients measured on specimens from lower loess I and III, were close to one highlighting that there is no collapse susceptibility. The different mechanical behavior of the strata was explained based on the processes suffered throughout their geological history. The mechanical stability of the lower loess I and III was attributed to the fact that these horizons correspond to a fragipan and a possible horizon cemented with calcium carbonate, respectively.

**Keywords:** loess, collapse, geological history, tosca, Corralito.

## INTRODUCCIÓN

Los mantos loésicos de la llanura cordobesa, debido a su proceso de formación, ya sea depositación eólica o retransporte (Pye y Sherwin 1999, Argüello et al., 2012), presentan características particulares de comportamiento, siendo propensos a sufrir grandes cambios volumétricos en su estructura que producen el colapso del material, debido a incrementos aislados o combinados del contenido de humedad y estado tensional. Sin embargo, a pesar de su inestabilidad, estos materiales son comúnmente utilizados como material de fundación en diversas obras de ingeniería, por lo que el conocimiento de sus propiedades y en especial lo que respecta a su comportamiento tensión-deformación y susceptibilidad al colapso, tiene un enorme impacto económico en la infraestructura civil.

Se han propuesto una gran cantidad de métodos para cuantificar la susceptibilidad al colapso de los suelos. Rocca (1985) y Redolfi (1990) presentan una recopilación y descripción exhaustiva de los mismos. Entre los numerosos métodos existentes, el ensayo de doble edómetro es probablemente el más popular.

El grupo de investigadores del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba es pionero en el estudio de los depósitos loésicos colapsables, el mismo ha dedicado a través de casi tres generaciones numerosas investigaciones a la temática desde fines de la década del '60 hasta el presente. Todo ello ha llevado a un gran avance en la implementación de metodologías para la caracterización de estos depósitos, criterios de diseño de fundaciones y modelos numéricos para la evaluación de su comportamiento tanto mecánico como hidráulico (Rinaldi et al., 1998; Zeballos et al., 2000; Clariá, 2003; Terzariol, 2009).

Si bien el origen de los sedimentos loésicos depositados a lo largo del territorio cordobés es similar, no ocurre lo mismo con su historia geológica, hecho que afecta al comportamiento mecánico. Por este motivo, los depósitos de loess se dividen en primarios y secundarios, de acuerdo a si han sufrido o no retransporte hídrico luego de su depósito (Rocca et al., 2007). Los loess primarios son aquellos depositados por el viento (*cordobense*, Frenguelli 1965) y los secundarios son loess que han sufrido alteraciones en su estructura original al ser retransportados (Fm. Pampeana) (Cantú y Blarasin, 1987; Piovano et al. 1992, Gaido et al., 2003). Si bien Santa Cruz (1978) la define como Fm Gral. Paz a todo el depósito de loess, numerosos autores resaltan diferencias en su comportamiento mecánico (Rocca et al., 2007; Francisca et al; Rinaldi et al., 2001). Los depósitos modernos son principalmente primarios, en el Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos (ASTM D2487) corresponden a los grupos ML y CL - ML. Mientras que los más antiguos, son suelos arcillosos y limosos clasificados como CL a CH, ML y generalmente se corresponden con loess secundarios. Los comportamientos geotécnicos extremos van desde ser suelos altamente compresibles y colapsables frente al humedecimiento en el caso de los primarios, al de ser depósitos preconsolidados por desecación en el caso de los loess secundarios (Rocca et al., 2006) con comportamiento mecánico estable y de elevada rigidez. La composición química es también responsable de la mayor o menor estabilidad de la estructura de los loess. La presencia de carbonatos cálcicos, óxidos de hierro y sulfato de calcio, afectan al comportamiento ingenieril de estos depósitos. Los carbonatos primarios están constituidos por minerales carbonáticos de origen detrítico como la calcita. Los carbonatos secundarios muestran una variedad de formas que van desde grandes cristales, a microcristales, películas, costras y nódulos (Quintana Crespo, 2005).

La estructura de los depósitos de loess (>70% limo) es abierta, con macroporos y aglomeraciones de partículas. La fábrica del depósito se encuentra compuesta por una fracción granular de arenas finas (menor al 20% en peso), unida entre sí a través de materiales cementantes como sales solubles, puentes de arcilla con elevada succión mátrica, carbonatos y silicatos (Rinaldi et al., 2001).

El agua tiene un rol preponderante en la formación y comportamiento posterior del loess (Rinaldi et al., 1998). A medida que el contenido de humedad decrece, la concentración iónica en los fluidos de los poros se incrementa, el espesor de la doble capa disminuye y las fuerzas de atracción de van der Waals prevalecen sobre las fuerzas de repulsión de la doble capa. Cuando las fuerzas de atracción interpartículas dominan, las partículas arcillosas floculan formando puentes de arcilla y contrafuertes en los contactos entre granos de arena y limo. Una mayor reducción del contenido de humedad, hace que los cationes hidratados de la doble capa se deshidraten y se vinculen iónicamente a las partículas arcillosas contiguas. Mientras tanto, la concentración de sales alcanza la saturación y precipitan como cristales que robustecen la estructura del suelo. El aumento contemporáneo de la succión aumenta también la resistencia, que es más efectiva entre partículas arcillosas en los puentes y contrafuertes, que en los meniscos entre partículas gruesas. El efecto combinado de estos procesos confiere al loess alta resistencia cohesiva que permite cortes verticales y la aptitud para soportar cargas importantes.

En contrapartida, el incremento del contenido de humedad revierte los procesos: las sales solubles se hidratan y debilitan, la concentración iónica en el fluido decrece, las fuerzas de repulsión se vuelven dominantes y las partículas arcillosas se dispersan, con la consiguiente disminución en la rigidez y la resistencia al corte. Asimismo, la succión disminuye gradualmente a medida que se incrementa el grado de saturación. Por estos motivos, la estructura se debilita y puede colapsar a veces sin alcanzar la saturación. Muy poca carga externa se requiere para alcanzar el colapso final, en ocasiones, con solo el propio peso de la masa del suelo es suficiente.

Vale destacar que los depósitos de loess no colapsan cuando son permeados por fluidos no polares. Esto señala la importancia de las arcillas y las sales de hidratación en el comportamiento metaestable (Francisca et al., 2015; Giomi, 2019).

A su vez, las grandes diferencias en compacidad, humedad y presencia de cementantes en los loess, hacen que la variabilidad espacial de las propiedades físicas y mecánicas de los mismos sea elevada (Francisca et al., 2008).

Por lo dicho, la resistencia, la rigidez y el grado de colapso están condicionados por el contenido de humedad del loess, la relación de vacíos, la fábrica, el tipo de fluido saturante, la cantidad de sales solubles, la cantidad de agentes cementantes no solubles, la profundidad, y el nivel de cargas externas.

Reginatto y Ferrero (1973) definieron el coeficiente de colapsabilidad como:

$$C = \frac{P_{fs} - P_o}{P_{fn} - P_o} \quad (1)$$

Siendo:

$P_o$ : Presión vertical debido al peso propio del terreno.

$P_{fn}$ : Presión de fluencia o colapso del suelo con contenido de humedad natural.

$P_{fs}$ : Presión de fluencia o colapso para suelo saturado.

En la expresión (1)  $P_{fn}$  y  $P_{fs}$  son determinados a través del método del doble edómetro.

La relación entre las presiones de colapso a baja humedad y en estado saturado ( $P_{fn}$  y  $P_{fs}$ ), que son propiedades del suelo, y el estado de tensiones *in-situ* ( $P_o$ ), conducen a la división de tres tipos de suelos:

- Si  $C < 0$  el suelo se denomina *verdaderamente colapsable* o *autocolapsable*, es decir al humedecerse la estructura colapsa aún sin la acción de cargas externas.
- Si  $0 < C < 1$  el suelo es *potencialmente colapsable*, es decir al humedecerse sufre grandes deformaciones solo si actúa una carga exterior superior a  $P_{fs}$ .
- Finalmente, si  $C=1$  el suelo no sufre alteraciones al humedecerse (no es colapsable).

El presente trabajo describe un estudio orientado a cuantificar la variación con la profundidad de la susceptibilidad al colapso por humedecimiento de un loess de la llanura pampeana cordobesa, a los fines de poder relacionar y explicar el comportamiento mecánico medido con los procesos sufridos por el suelo a lo largo de su historia geológica la cual abarca los últimos 115 mil años (Frechen et al., 2009).

A tal fin, a partir de resultados de ensayos de doble edómetro, se compara la colapsabilidad por humedecimiento (datos

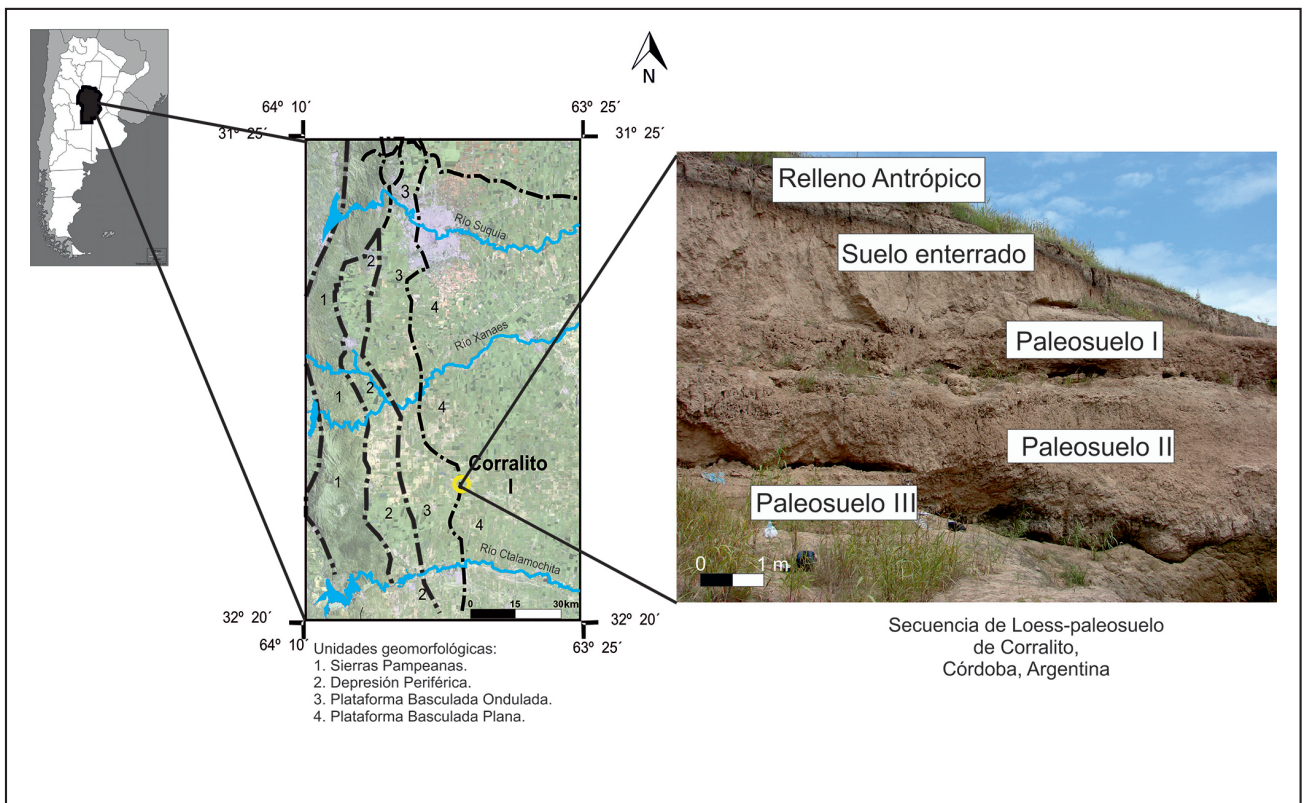


Figura 1. Ubicación geográfica del perfil de Corralito y el perfil litológico de la secuencia.

por los coeficientes de compresibilidad, coeficiente de colapsabilidad y presiones de fluencia a baja y elevada humedad) de mantos de loess con origen, granulometría y mineralogía similares, pero con diferentes historias geológicas, los cuales se ubican a diferentes profundidades en un perfil de 14 m ubicado en la localidad de Corralito (Provincia de Córdoba) tomado para estudio. La cárcava ubicada en Corralito seleccionada para la realización del presente trabajo, se caracteriza por presentar un perfil estratigráfico en el que cohabitan mantos de loess que han pasado por diferentes procesos.

### ÁREA DE ESTUDIO

El perfil de Corralito adoptado para estudio, constituye una secuencia de loess- paleosuelo que se encuentra aflorando en una cárcava ubicada en el departamento Tercero Arriba de la provincia de Córdoba, 3 km al norte de la localidad homónima (Figura 1).

Geomorfológicamente, se encuentra ubicado en la Llanura Pampeana. En ella, se distinguen dos asociaciones, la Depresión Periférica y la Plataforma Basculada (*Capitanelli, 1979*). En esta última, se distinguen dos sub-asociaciones: la Plataforma Basculada Ondulada y la Plataforma Basculada Plana. El perfil bajo estudio, se encuentra en la Plataforma Basculada Ondulada la cual está conformada por lomas orientadas E-O, cuya morfología es regular, alargada y convexa, con un gradiente inferior al 1%. Las lomas poseen alturas que rondan los 10 m. Es común que presenten erosión en surcos, tanto rectilíneos como meandriiformes, y en casos extremos, cárcavas (*Sanabria y Argüello, 2003*).

La secuencia de loess-paleosuelo es de edad Pleistoceno tardío-Holoceno (*Frechen et al., 2009; Rouzaut y Orgeira, 2017*) y está constituido por loess típico y retransportado, con abundante  $\text{CaCO}_3$  en la masa. Su textura es franca a franco-limosa (*Argüello et al., 2012; Rouzaut et al., 2015*) y mineralógicamente está conformado por cuarzo, feldespato, hornblenda, trazas de vidrio volcánico, illita, esmectita, e illita y esmectita interestratificada (*Rouzaut y Orgeira, 2017*).

*Rouzaut y Orgeira (2017)* definieron cinco unidades litológicas para el perfil de Corralito (Figura 2) cuyas características son similares en cuanto a granulometría y mineralogía. Cada una de estas unidades litológicas fue definida como un paleosuelo con su respectivo material parental (loess), por lo cual el perfil de Corralito está conformado (de base a techo), por tres paleosuelos con sus materiales parentales (loess), un suelo enterrado, y un relleno antrópico (Figura 1 y 2).

Los paleosuelos, son suelos que se formaron en paisaje del pasado, bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales y conservan constituyentes y morfología ligadas a esas condiciones (*Porta et al., 2019*). La alternancia de una secuencia de loess-paleosuelos representa una variabilidad climática a lo largo de la historia geológica e indicaría una estabilización del paisaje y una mayor tasa de pedogénesis que de sedimentación (*Frechen et al., 2009*). El suelo enterrado, es un suelo que ha sido recubierto por sedimentos modernos (donde se pueden observar residuos tales como latas, restos de ladrillos, entre otros) de 50 cm de espesor (*Frechen et al., 2009*).

Los suelos y paleosuelos son resultado de la acción de factores formadores y de procesos pedogenéticos que dejan su impronta en él. Con lo cual, el estudio de esta secuencia de loess- paleosuelo es importante desde el punto de vista de la geología del Cuaternario, pues permite dilucidar cómo fue el clima en el pasado y por lo tanto inferir escenarios futuros

Los procesos pedogenéticos que le dieron origen, a los paleosuelos, son similares a lo largo de todo el perfil, lo cual evidencia cambios climáticos sutiles en la región durante los últimos 115 mil años (*Rouzaut y Orgeira, 2017, Campodónico et al., 2019, Rouzaut et al., 2021*) De acuerdo a los análisis geoquímicos realizados por *Campodónico et al. (2019)* y *Rouzaut et al., (2021)* no hay cambios significativos entre la composición y los índices de meteorización de los paleosuelos y los mantos de loess, indicando condiciones ligeramente más húmedas durante la formación de los paleosuelos.

En el perfil estudiado los procesos pedogenéticos que se infieren en el suelo enterrado y los tres paleosuelos son, a saber, según su orden de aparición: descarbonatación-carbonatación; melanización; eluviación-iluviación de arcillas y materia orgánica (*Rouzaut et al., 2015*).

La descarbonatación-carbonatación implica la solubilización de los carbonatos en las estaciones húmedas, para lo que se requiere su transformación en bicarbonatos (descarbonatación) y posterior precipitación (carbonatación). Ello se produce gracias al  $\text{CO}_2$  y los ácidos orgánicos producidos por la actividad biológica por lo que su intensidad es máxima en los horizontes superficiales. El carbonato de calcio es removido de los horizontes superiores de suelo y precipita en los inferiores.

La eluviación- iluviación de arcillas y materia orgánica, es el movimiento vertical de estos materiales, en estado disperso en el perfil, movilizados por el agua de lluvia, y su posterior concentración iluvial de arcilla silicatada, hierro, aluminio, humus en los horizontes subsuperficiales (*Imbellone, et al., 2010*).

La melanización (del griego *mélas*-negro) son modificaciones de tipo químico y bioquímico del material del suelo que conducen al oscurecimiento por incorporación de compuestos orgánicos, provenientes de restos vegetales y en menor medida de restos animales (*Imbellone et al., 2010*).

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron un total de tres campañas para muestrear el perfil de Corralito. Se recorrió el terreno para seleccionar los puntos estratégicos para la toma de muestras. Una vez distinguidos los sitios de muestreo, se limpió el perfil de todo material meteorizado (aproximadamente 30 cm del frente expuesto) y se tomaron ejemplares en función de las características sedimentológicas, de manera de tener representada la Fm. Pampeana (*Gaido et al., 2003*) y los depósitos *cordobenses* (*Frenguelli 1965*) (Figura 2). Se tomaron cinco muestras del horizonte antrópico, tres del horizonte orgánico, cinco a los 2 metros de profundidad del loess superior, que correspondería al *cordobense* según Montes (1955), y veinte ejemplares de la Fm. Pampeana, siete del Loess Inferior I, seis del Loess Inferior II y siete del Loess Inferior III, a profundidades de 4; 8 y 14 metros respectivamente (Figura 3).

Las muestras consistían en panes de suelo inalterado, de forma aproximadamente cúbica y en el orden de 30 cm de lado, que fueron obtenidos con pico y pala de manera artesanal y luego envueltos en film ajustado, y acondicionados de manera de mantener inalterada la estructura y humedad del sedimento hasta llegar al laboratorio.

De cada pan de suelo (33 en total) se tallaron dos probetas cilíndricas idénticas de 63,5 mm de diámetro y 32 mm de altura para ser sometidas a ensayos de compresión confinada en edómetro, una probeta en condición de humedad natural y la otra en condición saturado con agua de la canilla (método del

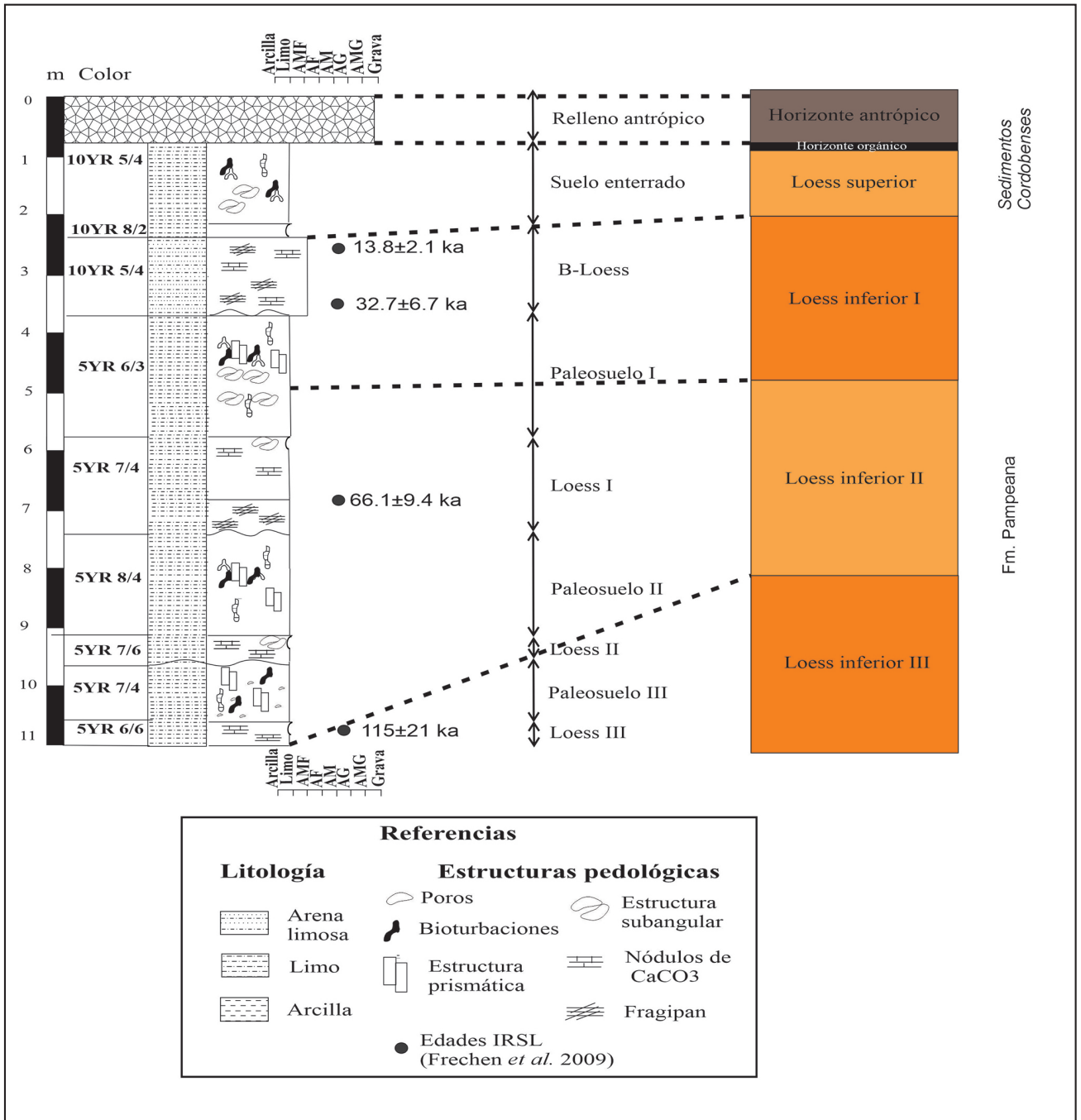


Figura 2. Correlación entre el perfil litológico (modificado de Rouzaut y Orgeira, 2017 y Rouzaut et al., 2021) a la izquierda y el perfil mecánico a la derecha.

doble edómetro). Los ensayos edométricos consistieron en la aplicación de seis saltos de carga y uno de descarga mediante el método de presiones controladas, alcanzando una presión vertical máxima del orden de 8 kg/cm<sup>2</sup>. Cada salto de carga se mantuvo estable durante un tiempo de aproximadamente 30 minutos, el cual resultó suficiente para que las deformaciones se estabilizaran y se pudiera proceder al siguiente salto de carga.

De cada ensayo edométrico se determinaron los siguientes parámetros del suelo, tanto en condición de humedad natural como saturada:

- Índice de compresibilidad en el tramo virgen (C<sub>c</sub>).
- Presión de fluencia (P<sub>fn</sub> y P<sub>fs</sub>).

- Coeficiente de colapsabilidad (C definido en la Ecuación 1)

Asimismo, durante el tallado de las probetas se determinó el peso unitario seco (γ<sub>d</sub>) y contenido de humedad (ω%) de las mismas.

A modo ilustrativo, en la Figura 4 se presentan curvas de compresibilidad típicas obtenidas en un ensayo de doble edómetro. En la misma se indican el Índice de compresibilidad y la presión de fluencia o colapso.

Finalmente, todas las muestras fueron clasificadas como dentro del Sistema Unificado de Clasificación de suelos y se determinó en 5 de ellas el porcentaje de carbonato de calcio mediante el método de Bernard (calcimetría).



**Figura 3. Perfil de Corralito. a) Vista panorámica de la cárcava. b) Horizontes antrópico, orgánico y loess superior (primeros 2 m). c) De base a techo: Loess Inferior II; Loess Inferior I; Loess Superior, H. Orgánico; H. Antrópico. d) Loess Inferior III (por debajo de los 11 m de profundidad).**

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados Experimentales

Los contenidos en peso de carbonato de calcio medidos en los diferentes estratos se ilustran en la Tabla 1 junto con los índices de plasticidad, porcentajes pasantes por el tamiz IRAM N° 200 (0,075 mm) y Clasificación dentro del Sistema Unificado de las mismas. Más detalles sobre estos horizontes pueden encontrarse en Rouzaut (2015). Se puede observar un ligero incremento en el porcentaje de carbonato de calcio con el aumento de la profundidad de la muestra, sin embargo, su clasificación no varía a lo largo del perfil y todas las muestras se clasifican como ML.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos de doble edómetro permitieron caracterizar los coeficientes de compresibilidad, presión de fluencia, peso unitario seco, contenido de humedad y susceptibilidad al colapso de los diferentes horizontes del perfil seleccionado tanto para un estado de baja humedad (humedad natural) como de saturación.

A modo de ejemplo en la Figura 5 se presentan los valores de los índices de compresibilidad en el tramo virgen ( $C_c$ ), coeficiente de colapsabilidad ( $C$ ), y presiones de fluencia tanto para un estado de humedad natural ( $P_{fn}$ ) como saturada ( $P_{fs}$ ) del horizonte denominado “loess superior”. También se ilustran los valores de los pesos unitarios secos ( $\gamma_d$ ) y contenidos de hu-

medad natural ( $\omega\%$ ) de las muestras de este manto. Este estrato se extiende desde la base del horizonte orgánico, a aproximadamente 1 m de profundidad, hasta cerca de 2,8 m. Presenta un color naranja mate (7.5 YR 7/4) y se trata de un material que aún conserva su estructura original generada al depositarse, por lo tanto, puede clasificarse como un loess primario.

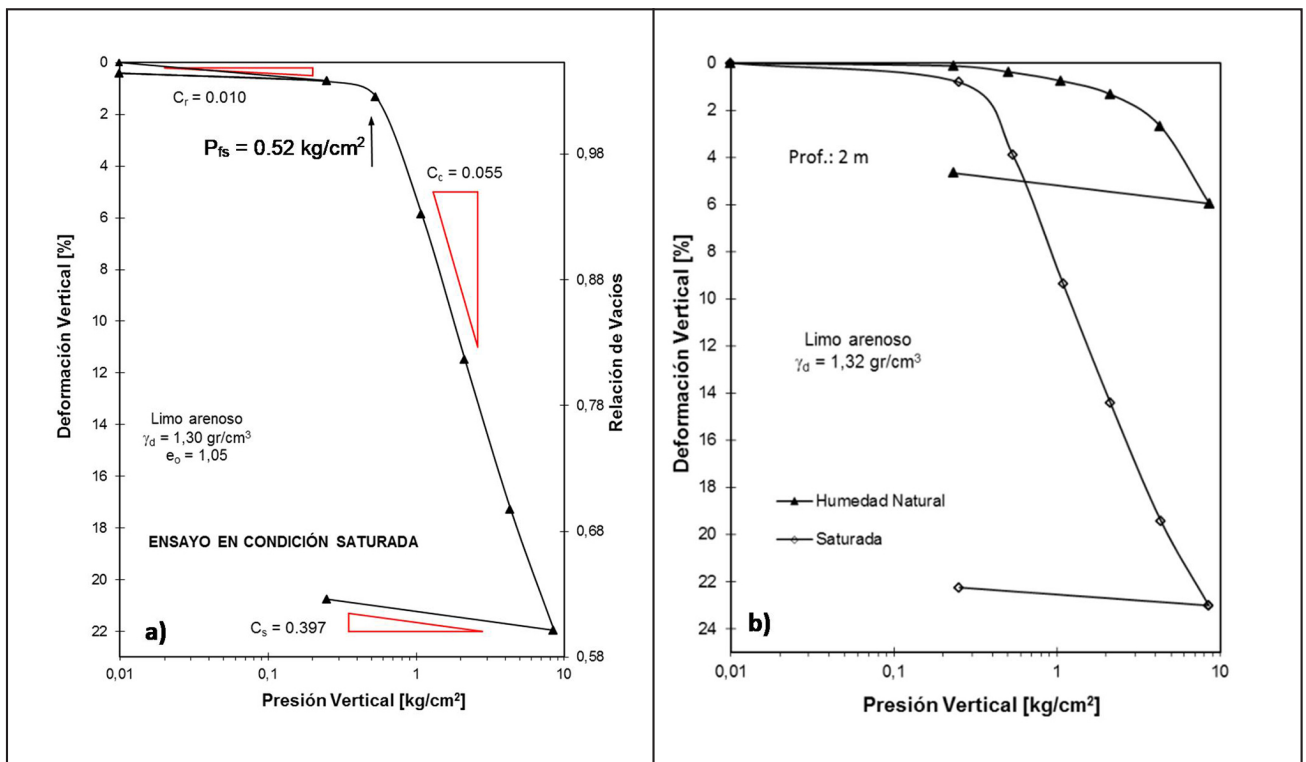
En la Figura 5a se aprecia que para el loess superior los coeficientes de compresibilidad ( $C_c$ ) obtenidos en las muestras ensayadas en condición de baja humedad (humedad natural) resultan considerablemente menores a aquellos obtenidos en condición saturada, poniendo de manifiesto el elevado potencial de colapso por humedecimiento de este suelo. El mismo comportamiento se evidencia al observar la Figura 5b, en la que la presión de fluencia obtenida en condición de humedad natural ( $P_{fn}$ ) es notablemente mayor a la medida en condición saturada ( $P_{fs}$ ).

Los valores del coeficiente de colapsabilidad (Figura 5c) resultan mayores a cero y menores a 1 ( $0 < C < 1$ ) por lo que este manto puede clasificarse como potencialmente colapsable, es decir que al humedecerse se produce el colapso de la estructura interna, solamente si actúa una sobrecarga exterior, ya que la presión geoestática (peso propio) no resulta suficiente para disparar el fenómeno de colapso. Finalmente, en las Figuras 5d y 5e se aprecian los bajos valores de peso unitario seco ( $\gamma_d$ ) y humedad natural ( $\omega\%$ ), consecuencia de una estructura suelta y macroporosa y tendiente al colapso.

**Tabla 1. Porcentaje de carbonato de calcio y las propiedades mecánicas de los diferentes estratos que componen el perfil de Corralito.**

Horizontes	Porcentaje de carbonato de Calcio	I.P.*	%PT#200*	S.U.C.S.*
Antrópico	--	1,5	94	ML
Orgánico	0,08	2,5	95	ML
Loess Superior	0,2	2,0	93	ML
Loess Inferior I	2,8	NP	95	ML
Loess inferior II	3,18	1,0	92	ML
Loess inferior III	5,57	NP	90	ML

\*S.U.C.S.: sistema unificado de clasificación de suelos; %PT#200: porcentaje pasante del Tamiz IRAM N° 200 (0.075 Mm); I.P.: índice de plasticidad



**Figura 4. a) curva de compresibilidad obtenida en estado saturado para una muestra del horizonte de loess superior, se aprecian los índices de compresibilidad en los tramos de recarga (Cr), virgen (Cc) y descarga (Cs) y la presión de fluencia o colapso ( $P_{fs}$ ). b) curvas de compresibilidad en estado de humedad natural y saturado evidenciando un comportamiento colapsable.**

### Comportamiento mecánico a lo largo de todo el perfil

Finalmente, del análisis de los datos obtenidos en los ensayos edométricos a lo largo de todo el perfil a modo de resumen se presentan en la Figura 6 la variación del coeficiente de compresibilidad (Cc) y del coeficiente de colapsabilidad (C) a lo largo de todo el perfil.

Puede notarse que el loess superior es el estrato que mayor susceptibilidad al colapso presenta en el perfil. El coeficiente de compresibilidad promedio en el tramo virgen (Cc) medido en condición de humedad natural es notablemente menor al medido en condición saturada. Igualmente, el coeficiente de colapsabilidad promedio para este manto resulta próximo a cero evidenciando un elevado potencial de colapso por humedecimiento.

Como puede apreciarse en la Figura 6, este comportamiento varía sustancialmente a lo largo del perfil. En el horizonte de Loess Inferior II, se sigue apreciando un comportamiento colapsable, aunque en mucho menor grado que el del loess superior. Sin embargo, los Loess Inferiores I y III, resultan mucho más rígidos y prácticamente sin susceptibilidad al colapso, fundamentalmente en el Loess Inferior III en donde se observa que los índices de compresibilidad (Cc) en estado natural y saturado resultan prácticamente iguales entre sí. De igual manera, el coeficiente de colapsabilidad (C) de este manto más profundo resulta igual a la unidad, lo que pone en evidencia que, si bien se trata de un loess con mineralogía y granulometría muy similar a la de los horizontes superiores, su comportamiento mecánico es notablemente diferente, sin mostrar susceptibilidad al colapso por humedecimiento.

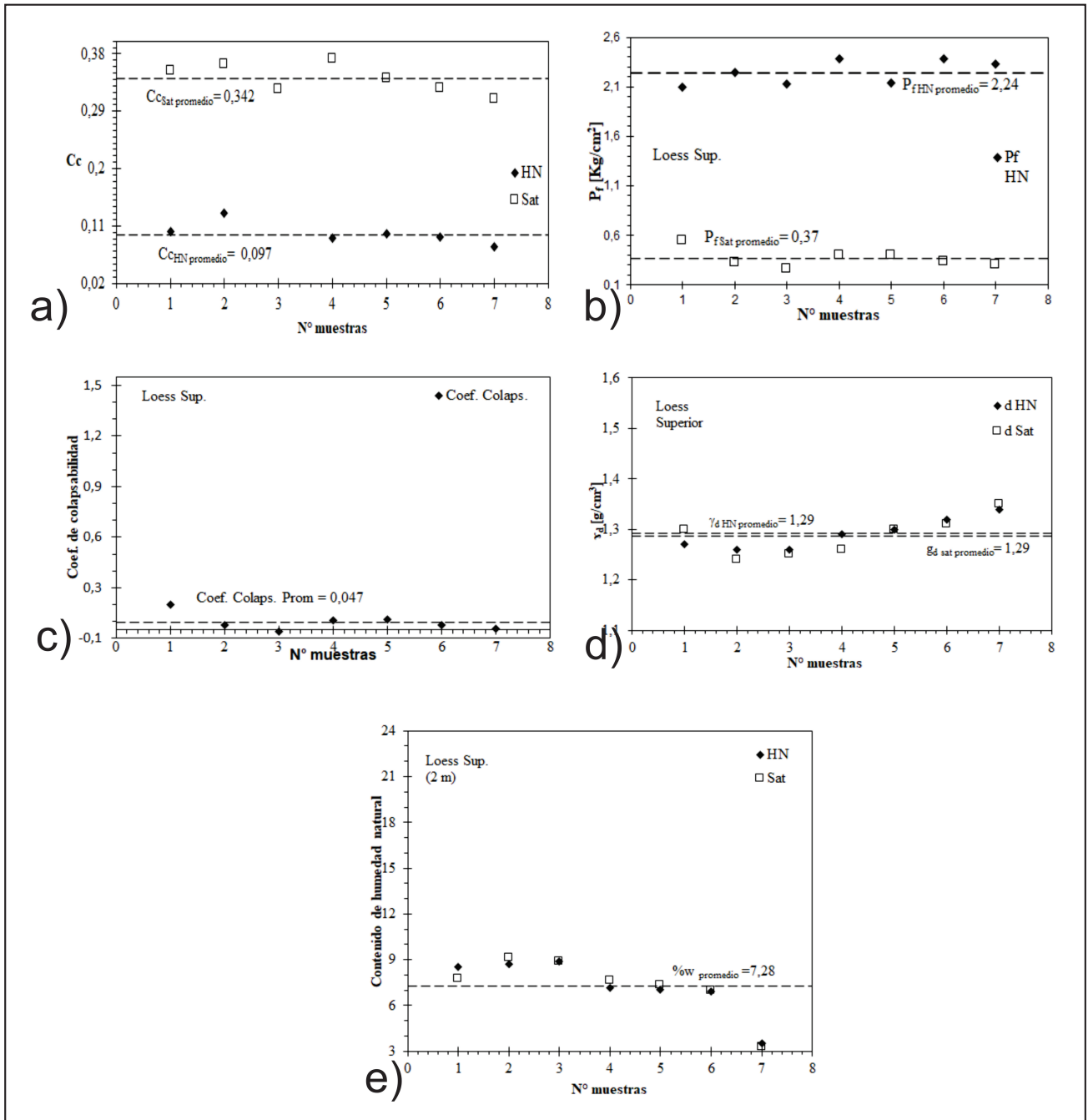


Figura 5. Resumen de resultados de ensayos de doble edómetro obtenidos en muestras del horizonte de loess superior. a) Coeficientes de compresibilidad en condición de humedad natural ( $C_c$  HN) y saturada ( $C_c$  Sat); b) Presiones de fluencia ( $P_f$ HN y  $P_f$ Sat); c) Coeficientes de Colapsabilidad; d) Pesos unitarios secos ( $\gamma_d$ ); e) Contenidos de humedad natural.

### Relación entre los parámetros mecánicos y la historia geológica

En la Figura 2 se presenta la correlación entre el perfil litológico (*modificado de Rouzaut y Orgeira, 2017 Rouzaut et al., 2021*) y el perfil mecánico de Corralito. Del análisis de los resultados de los ensayos mecánicos (edómetros) y químicos (contenido de carbonatos) sobre los diferentes horizontes del perfil y su comparación con su historia geológica se puede plantear la siguiente discusión.

### Horizonte Antrópico

De acuerdo a la Figura 2 este horizonte se correlaciona con su homónimo en el perfil estratigráfico. Según su comportamiento mecánico se lo clasifica como un horizonte potencialmente colapsable. En este horizonte la estructura interna se encuentra modificada y alterada por la acción del hombre. En ella se han encontrado restos de ladrillos, vidrio, latas (*Frechen et al., 2009*). Por otro lado, constituye el suelo que se encuentra actualmente cultivado, lo cual permite que el suelo a través de la vegetación incorpora materia orgánica (proceso de melanización) que al descomponerse deja espacios vacíos que favorecen el colapso.



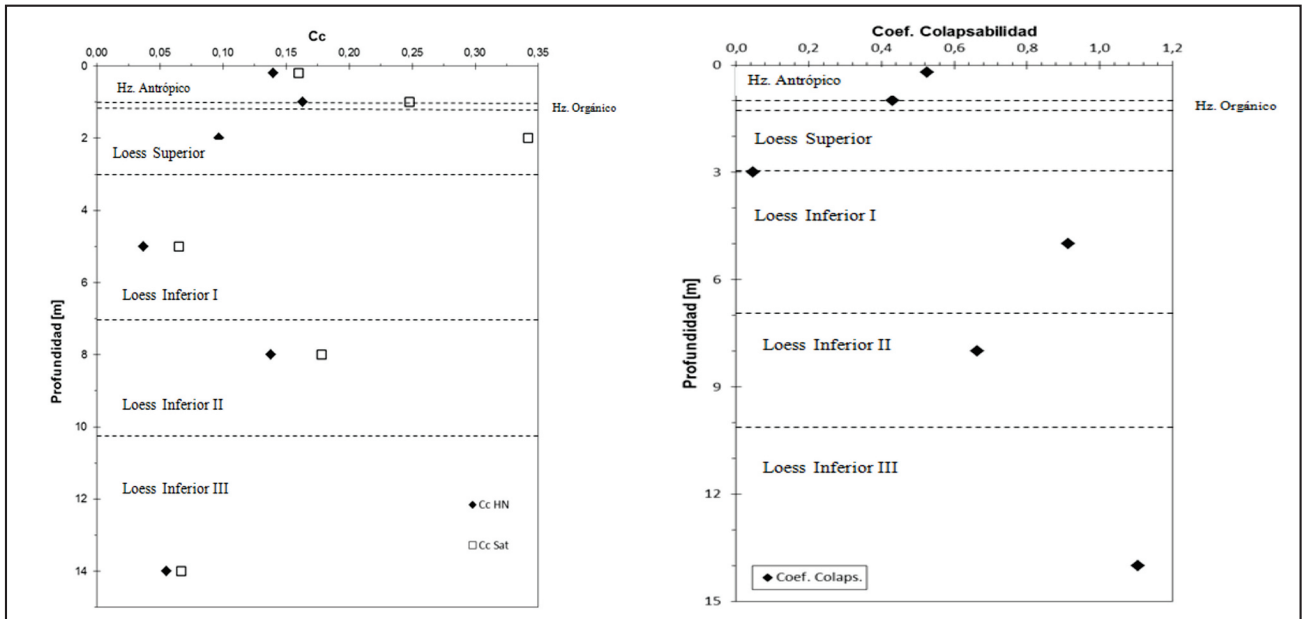


Figura 6. Variación con la profundidad de: a) los coeficientes de compresibilidad en el tramo virgen promedio y b) coeficientes de colapsabilidad promedio, para las muestras ensayadas a lo largo del perfil de Corralito en condición de humedad natural y saturada.

### Horizonte Orgánico

Desde el punto de vista mecánico se observó que el horizonte orgánico resulta potencialmente colapsable. Se trata de un manto rico en materia orgánica (1,7%) (Rouzaut et al., 2015) que quedó enterrado por el material antrópico. Nuevamente la presencia de materia orgánica, aportada por procesos de melanización, juega un papel fundamental en la compresibilidad, ya que al descomponerse genera espacios vacíos favoreciendo el colapso.

### Loess Superior

El Loess Superior del perfil mecánico se correlaciona con el loess que constituye el material parental del suelo enterrado del perfil estratigráfico. El suelo enterrado, el loess, y el relleno antrópico representan los sedimentos *cordobenses* (Frenguelli 1965) (Figuras 2 y 3). Observando los coeficientes de compresibilidad y de colapsabilidad de la Figura 6, se concluye que desde el punto de vista mecánico esta capa se comporta como un material potencialmente colapsable.

De acuerdo a los análisis granulométricos realizados por Argüello et al. (2012), este material constituye un loess típico lo que significa que es un material que fue depositado por el viento, sin ningún tipo de retransporte. De acuerdo a Rocca et al. (2006) son los denominados loess primarios, con alta probabilidad de colapso.

### Loess Inferior I

El Loess Inferior I del perfil mecánico se correlaciona con el Paleosuelo I y su material parental del perfil estratigráfico y representa, en parte, a la Fm. Pampeana (Gaido et al., 2003) (Figuras 2 y 3). El comportamiento mecánico de este horizonte en los ensayos de compresión confinada nos muestra que se trata de una capa relativamente rígida cuyas deformaciones no superan el 10 % para presiones elevadas (del orden de los 8 kg/cm<sup>2</sup>) incluso en estado de humedad elevada. En la Figura 6

los coeficientes de compresibilidad (Cc) en estado de baja y elevada humedad resultan bajos y similares, y el coeficiente de colapsabilidad (C) es próximo a uno. Por lo tanto, se lo clasifica como un material de bajo a nulo potencial de colapso.

Desde el punto de vista geológico, los procesos pedogenéticos que actuaron en el desarrollo del mencionado paleosuelo son descarbonatación-carbonatación, argiluviación y cementación. El comportamiento mecánico de esta capa, responde a las características geológicas de los fragipanes (panes de arcilla), y corresponde a horizontes iluviales, ricos en arcillas silicatadas posteriormente cementados con óxidos de hierro (USDA Soil Survey Staff - Claves para la Taxonomía de Suelos, 2014).

La palabra "fragipán" que proviene de "fragilis" (quebradizo), hace referencia a panes endurecidos con arcilla con baja conductividad hidráulica y cuyas propiedades físicas y químicas difieren de los horizontes que se encuentran inmediatamente por encima. Para su formación deben cumplir ciertas características del material originario (loess), como ser texturas francas (20 - 50% de arena, 30 - 70% de limo y 7 - 30% de arcilla), bajo contenido de materia orgánica (menor al 1 %), y presencia de agentes ligantes (puentes de arcilla y carbonato de calcio). La profundidad debe ser tal como para que la presión de tapada pueda generar una compresión apreciable (mayor a 1 m) pero a la vez permitir que llegue una cantidad suficiente de agua (Imbellone et al., 2010; Smalley y Marković, 2014). Los horizontes genéticos en los cuales encontramos los fragipanes son los horizontes subsuperficiales iluviales enriquecidos por arcilla traslocada, por lo cual el proceso pedológico inicial es la argiluviación.

En nuestro caso, el fragipán formado en el Loess inferior I, cumple con los requisitos mencionados arriba: la media granulométrica es limo medio (70%), arcilla (10%) y arena (20%) (Rouzaut y Orgeira, 2017), y para su origen se acepta la hipótesis del colapso de sedimentos por su propio peso, también denominada hidroconsolidación. Como ya se ha mencionado, los sedimentos

más colapsables son los sedimentos eólicos los cuales tienen características comunes con el material de los fragipanes, por lo tanto, podría asignárseles ese origen.

En nuestro caso, la condición inicial del sedimento referida a la posibilidad del autocolapso sería adecuada al igual que el humedecimiento, ya sea por cambio climático, evolución topográfica, o combinación de factores. El colapso sería un proceso post-depositacional al que continuarán procesos pedogenéticos que forman los puentes arcillosos.

### **Loess Inferior II**

El Loess Inferior II, constituye el material parental sobre el que se desarrolla el paleosuelo II que también pertenecería a la Fm. Pampeana, resulta más comprensible que el horizonte similar en granulometría, génesis y mineralogía inmediatamente superior (Loess Inferior I) y a su vez es susceptible al colapso por humedecimiento (ver Cc y C en Figura 6).

Este comportamiento se estima es consecuencia de que el fragipán que se encuentra por encima funciona como acuitardo, es decir como una barrera de menor permeabilidad que impide que el agua de lluvia percole. Al haber sufrido humedecimiento controlado a lo largo de su historia, se trata de un suelo que ha desarrollado escaso colapso en su estructura interna. No solo la compresibilidad e inestabilidad frente al humedecimiento de este manto son mayores a las del fragipán superior, sino que su relación de vacíos también es mayor.

### **Loess Inferior III**

Este estrato, corresponde al material parental sobre el cual se desarrolló el paleosuelo III, mostró un comportamiento rígido (valores pequeños y similares para alta y baja humedad de Cc en la Figura 6) y estable frente al humedecimiento o no colapsable (C próximo a uno en la Figura 6).

La rigidez y potencial de colapso nulo se atribuyen a los siguientes motivos:

- Estructura compacta por el peso de la columna sedimentaria lo cual se evidenció en los valores de peso unitario medidos en las probetas sometidas a compresión confinada.
- No se infirieron paleosuelos por lo que se supone que los procesos pedogenéticos que actuaron fueron la des-carbonatación-carbonatación.
- Se midieron porcentajes de carbonato de calcio superiores al 5 % en su masa (ver Tabla 1), por lo cual, si bien este valor es insuficiente para clasificarlo desde el punto de vista geológico como "calcrete" (se necesita 15% o más), se trata de un suelo calcáreo que puede ser identificado como una "tosca".

El origen del carbonato de calcio en el loess puede ser primario y provenir de la meteorización de la calcita, dolomita y/o de los feldspatos potásicos, todos minerales presentes en el sedimento eólico, o bien secundario, producto del movimiento vertical y/o horizontal del carbonato de calcio en horizontes próximos como consecuencia de la fluctuación de la freática.

En cuanto a la génesis de la tosca, hay dos hipótesis. Una hipótesis pedológica, que sostiene que la acumulación de  $\text{CaCO}_3$  es producto de la redistribución del mencionado elemento en el perfil del suelo como resultado de los procesos de des-carbonatación-carbonatación (Schiavo et al., 2015). Y, por otro lado, una hipótesis sedimentaria, que sostiene que el enriquecimiento en esta sal es resultado de la fluctuación de las aguas vadasas o

freáticas saturadas en carbonato de calcio. En ambos casos, estas acumulaciones son características de zonas con déficit de humedad estacional.

En el perfil estudiado, se supone que la "tosca" tiene un origen pedogenético (Schiavo et al., 2015), ya que de acuerdo a estudios previos (Rouzaut y Orgeira 2017, Campodónico et al., 2020) no hay evidencia de presencia del nivel freático en el perfil durante los últimos 115 mil años (Frechen et al., 2009). En cuanto al origen del carbonato de calcio, se infiere que es primario, de acuerdo a las investigaciones realizadas por Zárate (2003) y Gili et al. (2017) con algunos aportes locales provenientes de las Sierras Pampeanas (Argüello et al., 2012), el loess proviene de rocas volcánicas ricas en calcita y dolomita. Por otro lado, se cree que posee aportes secundarios provenientes de los afloramientos de calizas de San Agustín al Oeste como resultado del movimiento lateral de aguas subsuperficiales. Por el momento, y de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, se asume que el origen del carbonato de calcio es una combinación de material heredado (primario) y secundario (proveniente de los afloramientos). Sin embargo, para poder dilucidar con mayor certeza el origen del  $\text{CaCO}_3$  deberían realizarse análisis micro-morfológicos y químicos para determinar su proveniencia.

### **Discusión**

De acuerdo a los resultados expuestos, queda demostrada la estrecha relación que existe entre la historia geológica del depósito y su comportamiento mecánico. Si bien en todo el afloramiento estudiado el origen, granulometría y mineralogía de los suelos es similar, la historia geológica ha variado con la profundidad, lo cual es claramente evidenciado en el comportamiento mecánico y estabilidad frente al humedecimiento.

Los estudios realizados por Rouzaut et al. (2012), Rouzaut y Orgeira (2017), Campodónico et al. (2019) y Rouzaut et al., (2021) demuestran que hubo cambios climáticos sutiles, durante los últimos 115 mil años, no obstante, hubo contraste estacional (una estación húmeda y una estación seca marcada), lo cual permitió la traslocación de arcillas a lo largo del perfil con la presencia de horizontes subsuperficiales ricos en arcillas, distribuidos en toda la profundidad. Por otro lado, para el desarrollo de un suelo, se asume que el paisaje fue geomorfológicamente estable. Teniendo en cuenta estas premisas, puede reconstruirse la siguiente evolución geológica del perfil (de base a techo).

En primer lugar, se deposita el Loess inferior III, loess pulverulento, al cual se suceden períodos estacionales de humedad y sequía que permiten que por evaporación se formen las toscas. Esta formación se supone que también fue enriquecida en  $\text{CaCO}_3$  por el aporte de aguas abundantes en esta sal provenientes de los afloramientos de calizas ubicadas al oeste. Este material constituiría el material parental sobre el cual se desarrollaría el paleosuelo III.

A continuación, se deposita el Loess inferior II, que se corresponde con el loess II, material parental sobre el cual sigue un período de biostasia o pedogénesis que permitió el desarrollo del paleosuelo II.

Finalmente, y siguiendo el mismo razonamiento, se deposita el Loess inferior I, que se correlaciona con el loess I sobre el cual se desarrolla el paleosuelo I y por encima de este el Loess Superior. Este ciclo de biostasia y rexiostasia se repite hasta llegar al relleno antrópico, el cual por poseer gran cantidad de materia orgánica (debido a que es el actual piso de arado) se comporta como un

suelo altamente colapsable, cuyo uso es despreciable desde el punto de vista ingenieril.

El comportamiento mecánico del perfil y la formación del fragipán en el Loess inferior I responde a un proceso pos-depositacional. Producto del peso de la columna sedimentaria, más las características texturales del loess anteriormente mencionada, sumado a lluvias estivales se produjo el colapso del horizonte iluvial del paleosuelo I y se formó el fragipán (Loess Inferior I). Este fragipán es el que luego funciona como acuitardo y evita que el Loess Superior II se humedezca y colapse, por este motivo cuenta con una alta relación de vacíos.

### CONSIDERACIONES FINALES

Se desarrolló un estudio experimental sobre la compresibilidad y susceptibilidad al colapso por humedecimiento de un afloramiento de 14 m de profundidad ubicado en la localidad de Corralito (Provincia de Córdoba) compuesto por limos arenos arcillosos de tipo loésico. Del estudio realizado, se pueden remarcar las siguientes conclusiones.

Si bien los depósitos de loess presentes a lo largo de toda la secuencia estudiada presentan un origen, granulometría y mineralogía similares, su comportamiento mecánico resulta disperso, lo cual se vincula estrechamente a la historia geológica sufrida por los horizontes ubicados a diferentes profundidades.

A medida que los depósitos son más antiguos, fueron afectados por numerosos factores y procesos sobre todo cementaciones evidenciados por la mayor concentración de carbonatos de calcio o la sobreconsolidación por desecación lo cual, disminuye la susceptibilidad al colapso.

El horizonte antrópico, horizonte orgánico y loess superior (primeros tres metros del perfil) fueron clasificados como materiales potencialmente colapsables. El horizonte antrópico y el horizonte orgánico son ricos en materia orgánica, la cual al descomponerse deja espacios vacíos que benefician el colapso.

El loess superior, es un loess típico o primario y pertenece a los sedimentos *cordobenses*. Al tratarse de un sedimento eólico,

las características de su depósito generan una estructura porosa y suelta, lo cual favorece el colapso.

El loess inferior I no registra cambios importantes en su estructura interna ante un aumento en el contenido de humedad o un cambio en el estado tensional, es decir que desde el punto de vista mecánico se trata de un loess no colapsable. Esto se supone que se debe al grado de cementación con óxidos de Fe de sus partículas, ya que este horizonte, se corresponde con un fragipán, es decir un antiguo horizonte iluvial que colapsó.

El loess inferior III ubicado entre los 9-12 m de profundidad, pertenecería a la Fm. Pampeana y posee un mayor grado de compactación a causa de la sobreconsolidación que lo afectó a lo largo de su historia geológica. Este material tampoco registra cambios en su estructura si se modifican los factores extrínsecos como el contenido de humedad. Desde el punto de vista geológico este material se trataría de una tosca, debido a la cementación ya sea por redistribución o flujo de aguas ricas en  $\text{CaCO}_3$ , y también a la sobreconsolidación producto del peso de la columna sedimentaria. Desde el punto de vista mecánico es un material no colapsable y de baja compresibilidad.

Sin embargo, entre los dos horizontes mencionados, a los 8 m de profundidad, se presenta el loess inferior II con un comportamiento mecánico diferente. En este manto se registran deformaciones un tanto mayores en su estructura con respecto a los horizontes sub y suprayacentes. El material fue clasificado como "potencialmente colapsable". Este comportamiento se explica porque el fragipán que se encuentra por encima funcionó como acuitardo impidiendo el humedecimiento del loess subyacente.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico brindado a través del subsidio al proyecto Consolidar (33620180100574CB) y al Laboratorio de Geotecnia por el espacio y equipamiento. Por otro lado, se agradece a los evaluadores cuyas observaciones y comentarios mejoraron la calidad del presente trabajo.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARGÜELLO, G. L.; DOHRMANN, R. Y MANSILLA, L. (2012).  
Capítulo I Loess of Córdoba (Argentine) Central Plain, present state of knowledge and new results of research, New York  
*En Rossi y Miranda (eds.) Educational, Geographical and Cultural Issues, 1-49.*
- CAMPODÓNICO, V.; ROUZAUT, S.; PASQUINI, A. (2019).  
Geochemistry of a Late Quaternary loess- paleosol sequence in central Argentina: Implications for weathering, sedimentary recycling and provenance.  
*Geoderma, 351, pp. 235-249. Elsevier. ISSN: 0016-7061.*
- CANTÚ, M. P. Y BLARASÍN, M.T., 1987.  
Geología del Pleistoceno Superior-Holoceno del Arroyo Las Lajas - km 630, Dpto. Río Cuarto, Prov. de Córdoba.  
*X Congreso Geológico Argentino, Actas 1:337-340, San Miguel de Tucumán.*
- CAPITANELLI, R. (1979).  
Geomorfología. Geografía Física de la Provincia de Córdoba, Buenos Aires Editorial Boldt:  
*En Vázquez, J., Miatello, R. y Roqué, M. (eds.), 1979, pp. 213-294.*
- CLARÍA, J. J. (2003).  
"Caracterización y Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico del Loess en Estado Natural y Compactado".  
*Tesis Doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.*

- FRANCISCA, F. M.; ROCCA, R. J.; DAHBAR, P. Y VERRA, M. (2008).  
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.  
*XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2008), San Juan, Argentina.*
- FRANCISCA, F. M.; MONTORO, M. A.; REDOLFI, E. R.; PESCA PINTO, G. Y CAPDEVILA, L. A. (2015).  
"Behavior of collapsible loess saturated with NAPL in confined compression test".  
*Proceedings of the XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina.*
- FRECHEN, M.; SEIFERT, B.; SANABRIA, J. A. Y ARGÜELLO, G. L. (2009).  
Chronology of Late Pleistocene Pampa loess from the Córdoba area in Argentina.  
*Journal of Quaternary Science review, 24: pp. 761-772.*
- FRENGUELLI, J. (1965). GAEA 2, 117 (1957); J. POLANSKI, GEOL. SOC. ANMER. SPEC. PAP, 84, 453.
- GAIDO, M. F., M. SAPP, R.C. MIRÓ, G. SACCHI, 2010.  
Proyecto: Circuitos de interpretación geológica en áreas protegidas de la Municipalidad de Córdoba. Sitio de Interés Geológico Reserva Natural Urbana Gral. San Martín.  
*Informe, Cartelería y Folleto. SEGEMAR - Municipalidad de Córdoba. Argentina.*
- GILL, S.; GAIERO, D. M.; GOLDSTEIN, S. L.; CHEMALE, F; JWEDA, J.; KAPLAN, M. R.; BECCHIO, R. A. Y KOESTER, E. (2017).  
Cambios glaciales / interglaciales de la circulación del viento del hemisferio sur desde la geoquímica del polvo sudamericano,  
*la Tierra y Planetary Science Letters, doi: 10.1016 / j.epsl.2017.04.007.*
- GIOMI I. (2019).  
Comportamiento Edométrico de los Loess de Córdoba Inundados con Agua e Hidrocarburo.  
*Tesis de Maestría presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.*
- IMBELLONE, P.; GIMÉNEZ, J. Y PANIGATTI, J. (2010).  
Suelos de la región Pampeana: Procesos de formación.  
*INTA (ed.), Buenos Aires, 320 p..*
- MONTES, A. (1955).  
El Holoceno en relación con nuestra Prehistoria.  
*Comunicaciones del Museo de Mineralogía y Geología, FCEfyN, UNC, 25, pp. 1 - 28.*
- PIOVANO, E., MANZUR, A., PASQUINI, A. 1992.  
Análisis paleoambiental de las formaciones aflorantes al oeste de la Ciudad de Córdoba (Cretácico y Cuaternario).  
*IV Reunión Argentina de Sedimentología, Actas III:105-111. La Plata.*
- PORTA, J.; POCH, R. M. Y LÓPEZ-ACEVEDO, M. (2019).  
Edafología: uso y protección de suelos.  
*Mundi-Prensa Libros.*
- Pye K, Sherwin W (1999)  
Loess.  
*In: Goudie A, Livingstone I, Stokes S (eds) Aeolian environments sediments and landforms. Wiley, Chichester, pp 213-240.*
- QUINTANA CRESPO, E. (2005).  
Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos.  
*Tesis Doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.*
- REDOLFI, E. R. (1990).  
Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsibles.  
*Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.*
- REGINATTO, A. Y FERRERO, J. C. (1973).  
Collapse potencial of Soils and Soil - Water Chemistry.  
*Proceedings of the VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2, pp. 177 - 183.*
- RINALDI, V. A.; SANTAMARINA, J. C. Y REDOLFI E. R. (1998).  
Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing.  
*Proceedings of the International Conference on Geotechnical Site Characterization (ISC 98) Atlanta, Vol. 1, pp. 581 - 588.*
- RINALDI, V. A.; CLARIÁ, J. J. Y SANTAMARINA, J. C. (2001).  
The Small-Strain Shear Modulus (Gmax) of Argentinean Loess.  
*XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Estambul, Turquía, Vol 1, pp. 495 - 499.*

- ROCCA, R. J.  
Review of Properties of Loess Soils. CE 299 Report,  
*Tesis de Maestría presentada en la Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos.*
- ROCCA, R. J.; REDOLFI, E. R. Y TERZARIOL, R. E. (2006).  
Características Geotécnicas de los Loess de Argentina.  
*Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6 (2), 149–166.*
- ROUZAUT, S. (2015).  
Estudio geológico y de magnetismo ambiental de secuencias sedimentarias asignadas al Cuaternario tardío, expuestos en la Llanura Pampeana, Córdoba (R. Argentina), Implicancias paleoclimáticas.  
*Tesis Doctoral presentada en la F.C.E.F. y N. de la U.N.C., Córdoba, Argentina.*
- ROUZAUT, S.; ORGEIRA, M. J.; VÁSQUEZ, C.; ARGÜELLO G. L. Y SANABRIA, J. (2012).  
Magnetic properties in a loess-paleosol sequence of Córdoba, Argentina.  
*Revista de la Sociedad Geológica de España, 25, (1-2), 2012 55-63. ISSN: 2255-1379.*
- ROUZAUT, S., ORGEIRA, M. J., VÁSQUEZ, C., AYALA, R., ARGÜELLO, G. L., TAUBER, A., ... & SANABRIA, J. (2015).  
Rock magnetism in two loess-paleosol sequences in Córdoba, Argentina.  
*Environmental Earth Sciences, 73 (10), 6323-6339.*
- ROUZAUT, S. Y ORGEIRA, M. J. (2017).  
Influence of volcanic glass on the magnetic signal of different paleosols in Córdoba, Argentina;  
*Springer; Studia Geophysica Et Geodaetica; 61; 2; pp. 361-384.*
- ROUZAUT, S., CAMPODONICO, V. A., & PASQUINI, A. I. (2021).  
Weathering and paleoprecipitation indices in a Late Pleistocene-Holocene loess-paleosol sequence in central Argentina.  
*Environmental Earth Sciences, 80(1), 1-11.*
- SANABRIA, J. A. Y ARGÜELLO, G. (2003).  
Aspectos geomorfológicos y estratigráficos en la génesis y evolución de la Depresión Periférica, Córdoba.  
*II Congreso Argentino del Cuaternario y Geomorfología. Actas: 177-184, Tucumán.*
- SANTA CRUZ, J. N. (1978).  
Aspectos sedimentológicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, provincia de Córdoba, República Argentina.  
*Rev. Asoc. Geol. Argent, 23, 232-244.*
- SCHIAVO, H.; BECKER, A.; GRUMELLI, M. Y CANTÚ, M. (2015).  
Calcretas del Suroeste de Córdoba.  
*Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina, 1ra Edición, Ed. Imbellone Perla Editorial Facultad de Agronomía.*
- SMALLEY, I. J. Y MARKOVIĆ, S. B. (2014).  
Loessification and hydroconsolidation: There is a connection.  
*Catena, 117, pp. 94-99.*
- SOIL SURVEY STAFF. CLAVES PARA LA TAXONOMÍA DE SUELOS (2014).  
Traducción de la 12 edición 2010 de: Keys to Soil Taxonomy.  
*U.S. Department of Agriculture, 331 p.*
- TERZARIOL, R. E. (2009).  
40 años de Estudio de los Suelos Loésicos en Córdoba, Argentina. Desafíos y Avances de la Geotecnia Joven en Sudamérica,  
*Memorias de la III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes, Córdoba, Argentina, pp. 323-337.*
- ZÁRATE, M. A. (2003).  
Loess of southern South America.  
*Quaternary Science Reviews, 22, pp. 1987-2006.*
- ZEBALLOS, M. E.; TERZARIOL, R. E.; REDOLFI, E. R. Y ROCCA, R. J. (2000).  
Infiltración en Suelos Loésicos de la Provincia de Córdoba.  
*Memorias del XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG), Buenos Aires, Argentina, Vol 1., pp. 599 - 606.*