

DATACIÓN POR FOTOLUMINISCENCIA DE LA STONELINE Y OTRAS FORMACIONES SUPERFICIALES DEL LLANO DE OVEJAS, CORDILLERA CENTRAL, ANTIOQUIA

García, C.¹, Hermelin, M.¹; Lopez, G.I. ²; Sierra, G.M.¹;Toro, G.E. ¹; y Rink, W.J. ²

RESUMEN

En este trabajo se presentan las primeras dataciones obtenidas en Colombia mediante la aplicación del método de datación de fotoluminiscencia el cual permite datar el último momento en que un material estuvo expuesto a la luz y tiene un rango de aplicación que en condiciones óptimas va de 6 a 800 000 años, lo cual le confiere gran importancia para el estudio de depósitos del Cuaternario superior.

La zona de estudio comprende el Llano de Ovejas que constituye uno de los altiplanos de la cordillera Central. Las dataciones se realizaron en las formaciones superficiales del Llano de Ovejas con énfasis en la stoneline, un horizonte de acumulación de clastos con carácter regional. Además se realizaron algunas dataciones de depósitos aluviales y coluviales infrayacentes a la stoneline.

Las primeras edades obtenidas en el país por el método de fotoluminiscencia son las edades de la stoneline que incluyen $30\ 900 \pm 4\ 500$, $24\ 100 \pm 3\ 800$ y $18\ 900 \pm 2\ 300$ años para los horizontes FSO 07-2, FSO 16-2A y FSO 19-2 respectivamente. Estas edades se enmarcan dentro del Último Máximo Glacial, p

Palabras clave: superficies de erosión, fotoluminiscencia, stoneline, Llano de Ovejas, estratigrafía, métodos de datación.

OSL DATING OF STONE LINE AND OTHER SURFACE FORMATIONS LOCATED IN LLANOS DE OVEJAS, ANTIOQUIA, COLOMBIA

ABSTRACT

This work marks the first application of Photoluminescence (OSL- Optical Stimulated Luminescence) in Colombia. Photoluminescence method allows the determination of the age of burial of materials with a range from 6 to 800 000 years under optimal conditions; the method is really important for the study of diverse quaternary deposits.

Detailed field work, aerial photo analysis and stratigraphic study of the study area were completed with emphasis on the stoneline, a regional horizon of clastic accumulation. The aim of this work was to achieve a better understanding of the paleoenvironmental conditions when the surface formations of the area were originated, as well as the evolution of the highlands and uplift of the Central Cordillera.

The first ages obtained in Colombia by photoluminescence correspond to the stoneline: $30\ 900 \pm 4\ 500$, $24\ 100 \pm 3\ 800$ and $18\ 900 \pm 2\ 300$ years for the horizons FSO 07-2, FSO 16-2A and FSO 19-2 respectively. These ages belong to the Last Pleniglacial, erosive period of dry and cold conditions with intermittent rain and scarce vegetation.

Deposits below the stoneline were dated in $53\ 400 \pm 5\ 900$, $66\ 700 \pm 14\ 000$ and $36\ 000 \pm 4\ 900$ years at the horizons FSO 06-3, FSO 16-3 and FSO 19-3 respectively, which indicates they were formed during the humid period from 60 000 to 28 000 years BP.

Key words: erosion surfaces, photoluminescence, stoneline, Llano de Ovejas, stratigraphy, dating methods, Central Cordillera

¹Universidad Eafit, Medellín

²U, MacMaster, Canadá

INTRODUCCIÓN

En algunas zonas del norte de la cordillera Central (Colombia), se pueden distinguir altiplanos con topografías suavemente onduladas que conforman conjuntos de colinas menores con cimas planas de hasta 2600 msnm las cuales parecen corresponder a antiguas superficies de erosión. El sector de Llano de Ovejas es quizás uno de los lugares donde existen rasgos topográficos más representativos de una superficie de erosión en el norte de la Cordillera Central (Rendón, 2006). Según Page y James (1981) el Llano de Ovejas corresponde a una superficie de erosión correlacionable con la superficie de Rionegro (ubicada hacia el oriente de Medellín) formada posiblemente durante el Mioceno-Plioceno.

Las formaciones superficiales del altiplano de Llano de Ovejas incluyen de arriba hacia abajo: secuencia de cenizas volcánicas, horizonte tipo gley, stoneline, depósitos aluviales o coluviales y saprolito de rocas cristalinas. Dentro de las formaciones estudiadas se hace énfasis en la stoneline la cual constituye un rasgo casi permanente de los altiplanos e indica un periodo de cambio climático a condiciones posiblemente más frías y secas que las actuales. Con los resultados obtenidos mediante el método de fotoluminiscencia y los otros métodos de datación se pretende determinar si la stoneline se formó durante uno solo o varios eventos.

Este trabajo hace parte del proyecto “Cronología y Correlación de Geoformas y Formaciones Superficiales de dos Altiplanos de la Cordillera Central” aprobado por Colciencias y llevado a cabo por el Grupo de Geología Ambiental de la Universidad EAFIT. En dicho proyecto se pretende analizar paralelamente la formación, evolución y geocronología de las formaciones superficiales de los altiplanos de San Nicolás y Llano de Ovejas. Se busca con esto comparar las edades de las formaciones superficiales obtenidas mediante los métodos de datación de paleomagnetismo, trazas de fisión, palinología y por supuesto, fotoluminiscencia.

LOCALIZACIÓN Y GENERALIDADES

El Llano de Ovejas es un altiplano localizado en la parte norte de la Cordillera Central a 15 km al noroeste de Medellín entre las coordenadas 6°20'00"-6°28'00" y 75°34'00"-75°40'00" (FIGURA 1). Este altiplano hace parte de los municipios de San Pedro y Bello.

El área de estudio conformada por 82.2 km² fue delimitada por medio de “Trend Surface Analysis” con una altura base de 2550 msnm (Toro *et al.*, sometido). El área delimitada presenta en la parte central una zona plana compuesta por depósitos fluviales rodeada por colinas redondeadas de cimas planas compuestas principalmente por rocas graníticas del Batolito de Ovejas. Hacia el norte y sur de la zona de estudio se encuentran cinturones de rocas metamórficas, principalmente esquistos y anfibolitas.

La altitud media de la zona es de 2550 msnm, con una temperatura media de 15°C y una precipitación media anual de 1756 mm anuales (Gómez y Sánchez, 1999) con una distribución anual bimodal.

En cuanto al nivel freático, Rendón (2006) lo localiza a 1.5 m de profundidad en las zonas planas, el cual se eleva ampliamente en los periodos lluviosos.

Dentro de la zona de estudio se distinguen tres unidades con características geomorfológicas diferentes. La primera es la una unidad de vertientes compuesta por rocas metamórficas con alturas entre 2600 y 2700 msnm y con vertientes largas y abruptas en dirección noreste y valles profundos en forma de V. La segunda es la unidad de colinas con un relieve irregular con predominancia de colinas suaves, altura entre 2475 y 2550 msnm y pendientes medias, constituida por las rocas ígneas del Batolito de Ovejas. La tercera es la unidad de llanuras aluviales la cual es una zona plana constituida por depósitos aluviales, con alturas de 2550 msnm y pendientes muy suaves (García, sometido).

GEOLOGÍA

La zona está constituida en su mayoría por el Batolito de Ovejas, comagmático con el Batolito Antioqueño (González, 2001), con una extensión de 165 km² sobre la que se encuentran las poblaciones de Ovejas y San Félix de los municipios de Sopetrán y Bello respectivamente. La meteorización química de la zona ha formado sobre el Batolito de Ovejas un saprolito de decenas de metros de espesor que indica unas condiciones especiales para su formación las cuales se relacionan a su vez con la génesis de las demás formaciones superficiales de la zona de estudio. Los datos más recientes sobre el espesor del Saprolito del Batolito obtenidos por Rendón (2006), calculados por medio de métodos geoelectricos en la zona del Llano de Ovejas indican un espesor promedio de 81 m con un máximo de 110 m.

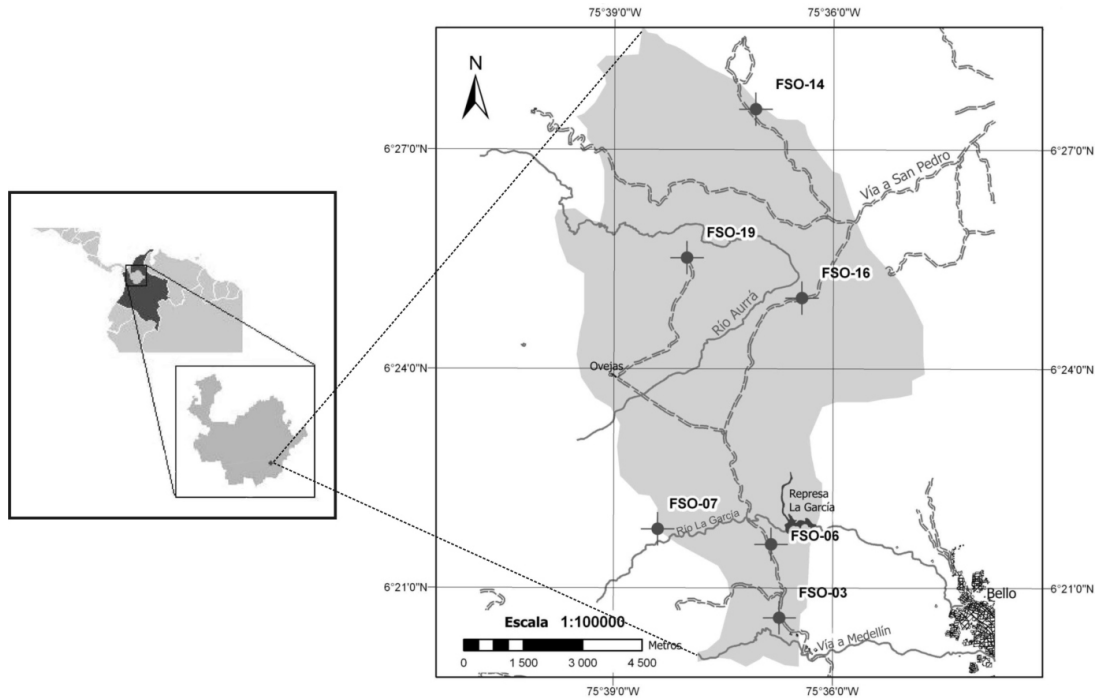


FIGURA 1. Localización del área de estudio, Llano de Ovejas.

Otros cuerpos importantes los constituyen, hacia el este, los Esquistos Cuarzo Sericíticos (Pzes) que forman parte de la unidad denominada “Complejo Cajamarca” (Maya y González, 1995) y hacia el nororiente los cuerpos de anfibolita (Pza).

El Llano de Ovejas hace parte de un bloque tectónico limitado por ramales de dos grandes fallas de carácter regional: la Falla Belmira Oeste al nororiente con orientación general N40°W y la Falla Cauca Romeral al suroccidente con una orientación principal N30°W.

FORMACIONES SUPERFICIALES

Las formaciones superficiales del altiplano de Llano de Ovejas incluyen de arriba hacia abajo: secuencia de cenizas volcánicas, horizonte tipo gley, stoneline, depósitos aluviales o coluviales y saprolito de rocas cristalinas.

Los depósitos de ceniza volcánica meteorizada constituyen en la unidad estratigráfica superior, fueron formados por acumulaciones sucesivas de productos volcánicos provenientes del macizo Ruiz-Tolima, ubicado a 120 km de la zona de estudio. Su depositación indica la edad mínima

de un periodo en el que se favorecen las condiciones de meteorización continua y por lo tanto profunda (Rendón, 2006). Los horizontes constituidos por estos materiales piroclásticos presentan espesores variables entre 0.5 y 1.5 m. Toro y Hermelin (1990) realizaron dataciones con C¹⁴ en restos orgánicos encontrados en las cenizas volcánicas con las cuales obtuvieron que la edad de las cenizas superiores varía entre 8 000 y 37 000 años. Este periodo se puede dividir en tres partes de tal manera que la unidad volcánica superior se desarrolló entre 10 000 y 8 000 años BP, la unidad volcánica intermedia alrededor de 20 000 años BP y la unidad volcánica inferior entre 37 000 y 30 000 años BP.

En algunas zonas, debajo de las cenizas volcánicas se encuentra un horizonte reductor u horizonte gley el cual es un horizonte pobremente drenado formado en zonas de empozamiento durante periodos de saturación o inundación que favorecen condiciones reductoras locales. En cuanto a su edad, Toro (1999), en la zona de El Tambo dentro del área este estudio, realizó una datación por trazas de fisión en los circones encontrados en depósitos lacústres localizados bajo la stoneline que arrojó una edad de 2.11 (0.14 Ma. Según Toro *et al.*, (2006) estos

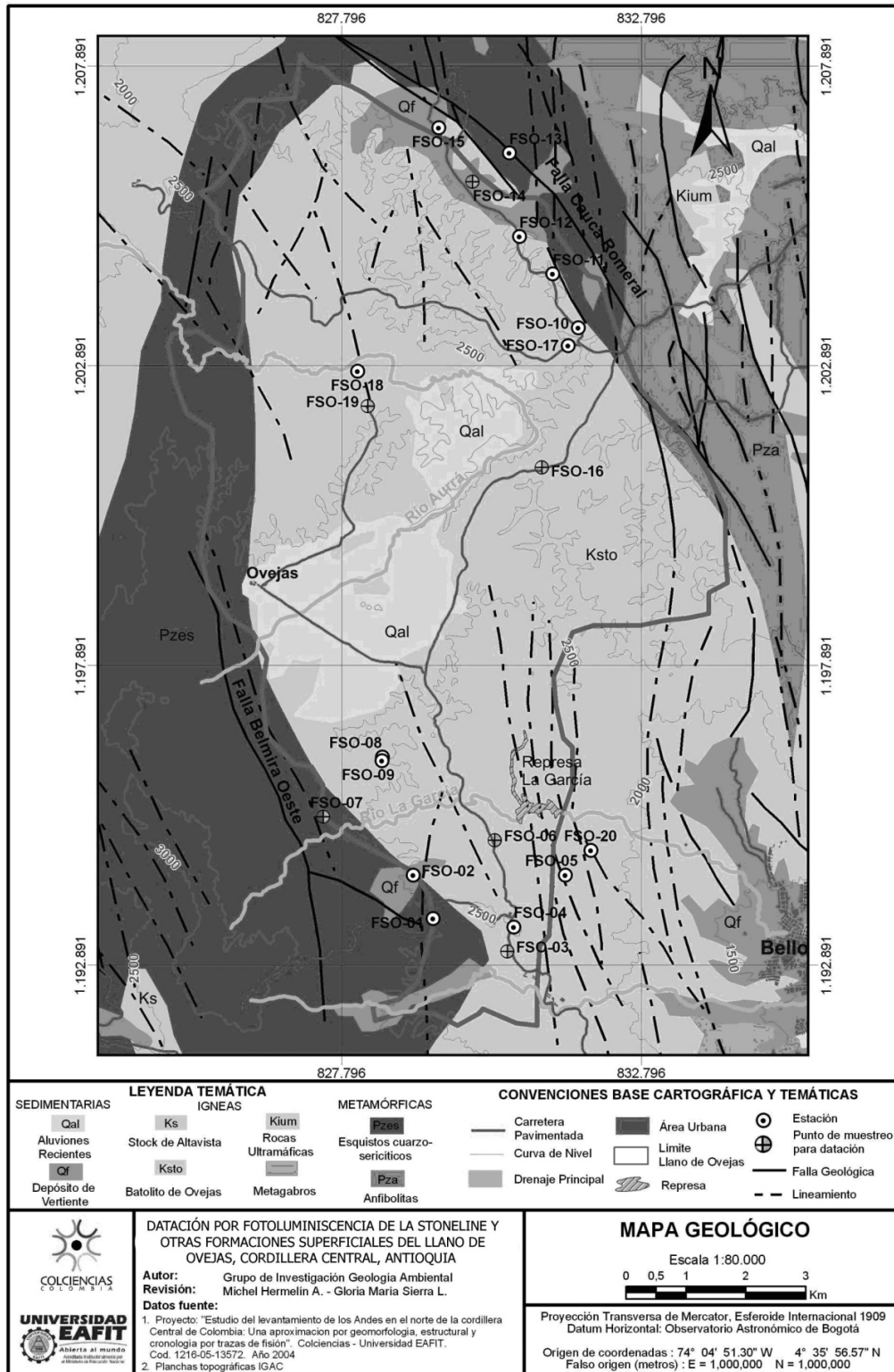


FIGURA 2. Mapa geológico y estructural del Llano de Ovejas

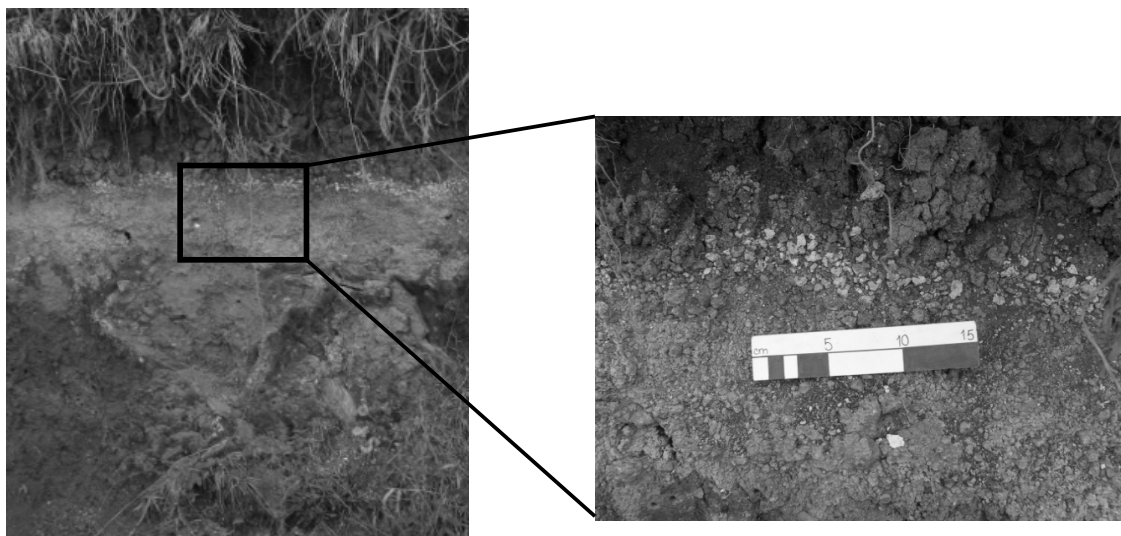


FIGURA 3. Stoneline en la estación FSO 11

horizontes lacústres posiblemente se formaron durante un periodo húmedo en el Plioceno tardío, contemporáneo con el volcanismo activo.

La stoneline es consecuencia de un fenómeno erosivo regional y un elemento común en la estratigrafía de los altiplanos del Departamento de Antioquia. En la zona de estudio se presenta como una capa continua de arena gruesa o clastos de cuarzo, gibbsita o nódulos de hierro embebidos en una matriz arcillosa muchas veces mezclada con minerales procedentes de ceniza volcánica (García, sometido). Los clastos que la conforman están compuestos usualmente por materiales resistentes a la meteorización como cuarzo y nódulos de hierro, y en algunas ocasiones puede presentar piedras preciosas y semipreciosas, oro, turmalina, etc. (ej. Hale y Porto, 1994; Wilhelm y Essono Biyogo, 1992; Angélica *et al.*, 1996; Porto y Hale, 1996; Johnson *et al.*, 2005).

Basados en su continuidad areal, su posición estratigráfica y la actual geomorfología, López *et al.* (sometido) consideran que la stoneline es el último evento erosivo generalizado que ocurrió en el altiplano y que no modificó substancialmente la topografía original. Su conservación está fuertemente relacionada con las cenizas volcánicas que la recubren.

Hermelin (1993) plantea que la stoneline se formó como consecuencia de cortos periodos de erosión superficial, posiblemente generada en condiciones secas que modificaron el sistema morfoodinámico y probablemente destruyeron la cubierta vegetal existente. Su corta duración fue deducida del hecho que los perfiles antiguos de suelo derivados del saprolito de cuarzodiorita, los sedimentos de terraza inconsolidados y las cenizas volcánicas más antiguas fueron parcialmente preservados y siguen la topografía el terreno actual.

Infrayaciendo a la stoneline se encuentran acumulaciones no consolidadas de material coluvial y aluvial por lo general altamente descompuestos. Contienen arcillas, limos, arenas y gravas gruesas mal seleccionadas usualmente sin estratificación, constituidas por clastos subredondeados de cuarzo y en algunas ocasiones pequeños bloques meteorizados (García, sometido).

PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE DATACIÓN: FOTOLUMINISCENCIA

La técnica de datación por luminiscencia o OSL (Optical Stimulated Luminiscence) presenta ventajas en términos de rango de edades (FIGURA 19) y tipo de material con respecto a métodos de datación como carbono 14

y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Fattahi & Stephen, 2002). La característica principal de este método es que data el último momento en que un material fue expuesto a la luz. En el caso de los depósitos estima la edad de la depositación. Una gran ventaja del método es que utiliza como materia prima el cuarzo, el cual es uno de los minerales más resistentes y abundantes en los diferentes climas. Otras aplicaciones del método incluyen reconstrucción ambiental, arqueología, ciencias forenses y el estudio de desastres naturales, entre otros.

Aitken (1998) plantea que mientras dura la exposición de un material a la luz (bleaching event) su señal latente es cercana a cero. Cuando la luz es suprimida al ser enterrado el material, esa señal latente comienza a aumentar debido que está expuesto a un débil flujo de radiación ionizante proveniente del torio, uranio y potasio-40 que se encuentran en el sedimento, así como también de los rayos cósmicos y del rubidio-87.

El proceso de datación consiste básicamente en que una vez preparada la muestra de granos de cuarzo ó feldespato (los cuales en ningún momento pueden ser expuestos a la luz solar) esta es expuesta a un rayo controlado de luz, con características semejantes a la luz solar, de tal manera que el mineral emite una señal luminiscente, proporcional a la energía acumulada desde del último momento de exposición, la cual se mide con un fotomultímetro.

La porción de granos de tamaño arena fina sometida al proceso de datación se denomina *alícuota*. La señal obtenida de la muestra se compara con las señales obtenidas de porciones a las cuales se han administrado dosis conocidas de radiación nuclear desde una fuente radioisotópica calibrada. Esto permite la evaluación de la *paleodosis*, la cual es la dosis de radiación nuclear necesaria para inducir una cantidad de luminiscencia igual a la adquirida luego del evento *bleaching* más reciente (última exposición a la luz solar) (Aitken, 1998)

La edad por datación con fotoluminiscencia es obtenida según la siguiente ecuación:

$$Edad = \frac{Paleodosis (Gy)}{Dosis\ anual (Gy / a)}$$

La edad se obtiene a partir del cociente entre la energía total acumulada durante el período de enterramiento (*paleodosis*) y la *dosis anual* de radiación que ha recibido el mineral.

METODOLOGÍAS PARA LA TOMA, PREPARACIÓN Y DATACIÓN DE MUESTRAS DEL TRÓPICO HÚMEDO PARA SU DATACIÓN CON FOTOLUMINISCENCIA

Por las características del material datado y por el hecho que las muestras para fotoluminiscencia no pueden ser expuestas a la luz en ningún momento, se construyó un aparato percutor para la extracción de muestras para fotoluminiscencia en el trópico húmedo que consiste en un tubo de acero altamente resistente al impacto, con un extremo afilado dentro de cual se coloca un tubo de aluminio de 20 cm que alberga la muestra (García, sometido).

Una vez extraída la muestra, se procedió a realizar su preparación en el Laboratorio de Fotoluminiscencia de la Universidad EAFIT, Medellín. Este pretratamiento se realiza para sacar el cuarzo puro de la muestra. Para lograr esto cada muestra se tamiza varias veces para eliminar los tamaños finos y seleccionar las fracciones 90-150 μm y 150-212 μm , luego se coloca a reaccionar por varios días con ácido clorhídrico (HCl) al 33 a 37% y posteriormente con péroxido de oxígeno (H₂O₂) al 35% a 50% y finalmente se realiza una separación con líquidos pesados, específicamente sodio politungstato, para separar el cuarzo de los minerales pesados y el feldespato.

Luego del pretratamiento realizado en el Laboratorio de Fotoluminiscencia de la Universidad EAFIT, las fracciones de cuarzo obtenidas fueron enviadas a Canadá donde se realizó la metodología para la datación de muestras descrita a continuación y tomada de López *et al.* (sometido). Este proceso fue realizado por la investigadora Gloria López en el Laboratorio de Arqueometría y Geocronología (AGE Laboratory) de la Universidad McMaster en Canadá.

El cuarzo obtenido fue tratado dos veces con 40% HF por 40 min para remover las plagioclasas que pudiesen haber quedado, así como eliminar la capa exterior de cada grano para evitar la interferencia de los rayos α en los resultados. Posteriormente el cuarzo se trató por 40 min en 10% HCl para remover las fluoritas precipitadas.

Los granos de cuarzo puro se montaron en discos de aluminio con silicona en spray usando una máscara de 8 mm. Las mediciones de fotoluminiscencia (OSL – por sus siglas en inglés, Optical Stimulated Luminiscence) se llevaron a cabo utilizando un Sistema RISØ TL/OSL Modelo TL-DA-15, equipado con una fuente ^{90}Sr β y la OSL fue medida utilizando fuentes de luz azul de 470 nm

y un filtro de 7 mm grueso pasabanda tipo Hoya U-340 (270-400 nm).

El protocolo de cuota única de dosis regenerativa (SAR – *single aliquot regenerative-dose*) fue aplicado a todas las muestras. La dosis equivalente inicial (D_E), la contaminación por feldespatos (determinada con luminiscencia estimulada por infrarrojos - IRSL), la transferencia termal y los *test recovery dose* fueron realizados en 27 alícuotas de cada muestras. Para la estimación de la D_E final, cada alícuota fue estimulada a 125°C por 100 s dando 6 dosis regenerativas (de las cuales una fue cero y la final fue la repetición de la primera dosis dada).

Aunque las dosis de radiación α y β fueron calculadas con base en la concentración radioisotópica de todo el sedimento, la radiación α fue calculada en los sitios de muestreo (excepto en FSO 19) utilizando un Gamma Espectrómetro Nutmaq-Harwell. Se utilizaron los valores promedio correspondientes a U y Th en cuarzo granítico (Rink y Odom, 1991) para estimar las dosis internas de U y Th. La dosis cósmica basada en los cálculos de Prescott y Hutton (1988) fue calculada utilizando los datos de profundidad desde la superficie y la geometría del lugar de cada muestra. Para todos los cálculos se asumió una densidad sobreestimada de 2.0 g/cm³. Todas las edades fueron calculadas utilizando el software ANATOL 0.72B (cortesía de N. Mercier, CNRS, París) con un error sistemático total de 10% para incluir las variaciones en el contenido de agua y cualquier otro error cometido durante el proceso.

La intensidad de la señal de OSL fue calculada tomando los primeros 0.4 s de la intensidad de luminiscencia, mientras que para el background se tomaron los 4.0 s finales de una medición de 100 s. Para el análisis DE sólo se utilizaron las alícuotas con un recycling ratio de entre 0.90 y 1.10. Para el cálculo de las edades, cualquier alícuota que cayera fuera del rango de 2σ del valor medio de D_E (obtenido para cada alícuota) fue tratada como un outlier y fue excluida para el cálculo de la D_E final. El valor medio final de D_E se basa en el “common age model mean” de Galbraith et al. (1999). Todas las edades OSL son relativas al datum A.D 2006 y el error asociado es una desviación estándar de la D_E media final.

RESULTADOS OBTENIDOS

Durante los recorridos de campo preliminares se seleccionaron en diferentes sectores del Llano de Ovejas,

principalmente en cortes de carretera, un total de 20 afloramientos (FIGURA 2) de hasta 6 m de altura en los cuales se realizó una descripción estratigráfica completa de cada perfil y un muestreo preliminar de cada estrato. Posteriormente se eligieron los 6 afloramientos más completos y se efectuó un muestreo sistemático de cada estrato para analizar su mineralogía y tamaño de grano y proceder finalmente a la toma de muestras para datación según los diferentes métodos de datación. Además del muestreo para la datación por foluminiscencia se tomaron muestras para los métodos de trazas de fisión, paleomagnetismo y palinología cuyos resultados se esperan prontamente para poder comparar de esta manera los obtenidos mediante el método de fotoluminiscencia que se muestran en la TABLA 1.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el periodo de 60 000 a 28 000 años BP predominaron condiciones húmedas (Thouret *et al.*, 1997) propicias para la formación de depósitos aluviales y coluviales, lo cual explica las edades obtenidas para los horizontes FSO 06-3, FSO 14-2, FSO 16-3 y FSO 19-3 ($53\ 400 \pm 5\ 900$, $93\ 400 \pm 10\ 000$, $66\ 700 \pm 14\ 000$ y $36\ 000 \pm 4\ 900$ años respectivamente (García, sometido).

Las edades de $30\ 900 \pm 4\ 500$, $24\ 100 \pm 3\ 800$ y $18\ 900 \pm 2\ 300$ años obtenidas para la stoneline (Tabla 1) en las estaciones FSO 07-2, FSO 16-2A y FSO 19-2 respectivamente, se enmarcan dentro del Último Pleniglacial (o Último Máximo Glacial) de 28 000 a 14 000 años BP, equivalente al Estadio Isotópico Marino 2 (OIS2 por sus siglas en inglés). Este periodo marca el inicio de un fuerte periodo erosivo en el que, a pesar de presentar ciertas fluctuaciones climáticas, prevalecían condiciones secas y frías (Van Geel, B. y Van der Hammen (1973), Helmens (1988), Clapperton (1993), Helmens *et al.* (1997), Thouret *et al.* (1997), Iriondo (1999), Van der Hammen y Hooghiemstra (2003), Vélez *et al.* (2003) Marchant *et al.* (2004), Torres *et al.* (2005) y González *et al.* (2006))

García, (sometido) plantea que el proceso de formación de la stoneline en la zona de estudio puede haber sido el siguiente: desde hace 90 000 a 30 000 años BP se depositaron materiales aluviales y coluviales sobre el perfil de meteorización del basamento siguiendo la topografía, posteriormente se meteorizó la matriz y los clastos más débiles dejando sólo los materiales más resistentes. A partir de 28 000 años BP, durante el Último Máximo Glacial, primaba un clima seco y frío de poca vegeta-

TABLE 1. Edades SAR OSL y datos de muestras datadas en Llano de Ovejas. Las edades de cada muestra se encuentran en negrilla (Tomado de López *et al.*, sometido)

Muestra	Composi- ción	De (Gy) ^a	238-U (ppm) ^b	232-Th (ppm) ^b	K % ^b	Conte- nido de agua % ^c	Dosis Cósmica (γ Gy/a) ^d	Dosis Anual (γ Gy/a) ^e	Edad SAR OSL ^a	Error SAR OSL $\pm 1\sigma(a)$ ^{&}	Dosis Anual (γ Gy/a) ^f	Edad SAR OSL ^{*&}	Error SAR OSL $\pm 1\sigma(a)$ ^{*&}
FSO 06-3	Depósito aluvial	74.82 \pm 4.46	2.66 \pm 0.1	5 . 8 0.37	0.1900 \pm 0.0059	22.35	198.86	1238.2 \pm 22	60 400	5 900	1400.36	53 400	5 900
FSO 07-2	Stoneline	52.57 \pm 4.77	2.63 \pm 0.1	10.31 \pm 0.6	0.6869 \pm 0.0182	41.80	180.46	1651.8 \pm 27.9	31 800	4 500	1703.93	30 900	4 500
FSO 14-2	Depósito aluvial	135.81 \pm 9.81	2.20 \pm 0.1	5 . 6 2 0.36	0.5918 \pm 0.0156	19.52	172.83	1436.6 \pm 23.6	94 500	10 000	1453.71	93 400	10 000
FSO 16-2A	Stoneline/ gley	20.05 \pm 2.11	2.13 \pm 0.1	3 . 5 5 0.24	0.0283 \pm 0.0028	43.13	173.30	748.9 \pm 15.4	26 800	3 800	830.95	24 100	3 800
FSO 16-3	Depósito coluvial	46.28 \pm 13.13	2.53 \pm 0.1	5 . 8 0.37	0.0134 \pm 0.0018	29.83	166.48	971.6 \pm 20.2	47 600	14 000	994.43	66 700	14 000
FSO 19-2	Stoneline/ gley	46.28 \pm 2.6	8.55 \pm 0.1	13.34 \pm 0.85	0.0711 \pm 0.0042	38.90	183.42	2449.1 \pm 35.4	18 900	2 300	n/a	n/a	n/a
FSO 19-3	Depósito aluvial	72.35 \pm 5.31	5.58 \pm 0.1	16.73 \pm 1.05	0.0086 \pm 0.0035	43.42	192.98	2012.3 \pm 41.6	36 000	4 900	n/a	n/a	n/a

^aDosis equivalente para el tamaño de máscara de 8 mm. El error es 1 σ de la dosis equivalente media final

^b Valores de U, Th y K determinados por NAA

^c Contenido de agua como fracción del peso seco determinado por mediciones en el laboratorio

^d Valor de la tasa de dosis cósmica calculado usando una densidad sobreestimada de 2 g/cm³

^e Todas las dosis de β y γ fueron calculadas basadas en las concentraciones de U, Th y K de cada muestra tomando en cuenta los valores de humedad de la muestra

^f Dosis calculada con dosis γ in situ

* Valores de edades corregidos basados en ^f

& Valores redondeados a números sensibles de precisión

ción, diferente a las condiciones húmedas actuales, con precipitación intermitente lo cual favoreció la erosión laminar con lavado de finos y posterior acumulación de los materiales mas gruesos y resistentes, en este caso clastos de cuarzo, gibbsita y nódulos de hierro, los cuales constituyen la actual stoneline. Esta hipótesis de formación para la stoneline sugiere que el transporte de los clastos que la constituyen es mínimo, de distancias máximas de decímetros a metros, por lo cual se deduce que los clastos redondeados que la componen en algunos perfiles provienen de la removilización depósitos aluviales previos. Respecto al origen de los clastos que conforman la stoneline, se cree que estos pueden proceder de diques y venas presentes en el Batolito de Ovejas o en las rocas metamórficas, o pueden ser clastos provenientes de los depósitos infrayacentes a la stoneline.

En cuanto a las capas de cenizas superiores a la stoneline, además del trabajo de Toro y Hermelin (1990), se encontraron algunos trabajos realizados principalmente en el lago Fúquene en la Cordillera Oriental donde encontraron capas de cenizas procedentes de la Cordillera Central. Algunos de estos trabajos incluy Van der Hammen y Hooghiemstra (2003) encontraron cenizas volcánicas en intervalos 22 500 a 18 500 años BP y de 25 000 a 19 000 años BP; Van Geel, B. y Van der Hammen (1973) también encontraron capas delgadas de ceniza provenientes de la Cordillera Central datadas en 9 000, 11 000, 21 000, 22 000, 26 000 y 30 000 años BP; por su parte Thouret *et al.* (1997) reportan en la Cordillera Central evidencias de repetitiva actividad volcánica de menor escala durante el periodo del Último Glacial Máximo.

Las edades antes planteadas para las primeras capas de cenizas superiores se enmarcan dentro del Último Máximo Glacial en el que prevalecieron condiciones frías y secas lo cual favoreció la preservación de las cenizas volcánicas. En cuanto a las cenizas volcánicas más jóvenes, estas se depositaron hacia el final del Último Máximo Glacial y durante el inicio de un último periodo de condiciones húmedas y cálidas lo cual ayudó en la diferenciación de las capas de ceniza y su preservación.

Resta esperar los resultados de la datación de las cenizas volcánicas por los métodos de trazas de fisión, palinología y paleomagnetismo para comparar dichos resultados con los mostrados anteriormente.

CONCLUSIONES

Por medio del método de fotoluminiscencia se obtuvo una edad de $53\,400 \pm 5\,900$, $66\,700 \pm 14\,000$ y $36\,000 \pm 4\,900$ años para los depósitos de los horizontes FSO 06-3, FSO 16-3 y FSO 19-3. De lo anterior se deduce que estos depósitos se formaron durante el periodo de 60 000 a 28 000 años BP durante el cual predominaron condiciones húmedas propicias para la formación de depósitos aluviales y coluviales.

Los espesores de los depósitos menores de 6 m indican que el Llano de Ovejas no era una cuenca de sedimentación importante, sino más bien una expresión de levantamiento con subsidencia remanente, lo cual explicaría en cierta manera el hecho que en esta zona haya evidencias de deformación compresiva (como plegamientos, etc.) asociada a los levantamientos en los depósitos sobre el batolito.

Las edades obtenidas para la stoneline en el Llano de Ovejas fueron de $30\,900 \pm 4\,500$, $24\,100 \pm 3\,800$ y $18\,900 \pm 2\,300$ años en los estratos FSO 07-2, FSO 16-2A y FSO 19-2 respectivamente. Estas edades se enmarcan dentro del Último Pleniglacial (o Último Glacial Máximo) de 28 000 a 14 000 años BP, equivalente al Estadio Isotópico Marino 2 (OIS2 por sus siglas en inglés).

Con las edades obtenidas para las distintas stoneline del Llano de Ovejas se concluye que estas son un lag erosivo formado durante el Último Glacial Máximo, en diferentes pulsos de condiciones secas, frías y poca presencia de vegetación con precipitación continua, lo cual generó una interrupción abrupta de las condiciones sedimentarias y desencadenó una fuerte erosión superficial con consecuente lavado de finos y posterior acumulación de los materiales más resistentes como cuarzo y minerales pesados. Posteriormente durante finales del Último Glacial Máximo se depositaron capas delgadas de ceniza volcánica que actuaron como escudo protector de la stoneline.

REFERENCIAS

- Aitken, M.J. (1998). An Introduction to Optical Dating: the Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence. Oxford Science Publications. 267 p.
- Angélica, R. S., da Costa, M. L. and Pöllmann, H. (1996). Gold, wolframite, tourmaline-bearing lateritized gossans in the Amazon region, Brazil. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 57, (1-3), pp. 201-215

- Clapperton, C. (1993). *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam. 796 p.
- Fattahi, M. & Stephen, S. (2003). Dating volcanic and related sediments by luminescence methods: a review. *Earth-Science Reviews*, Vol. 62, pp. 229–264
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H. and Olley, J.M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry*, Vol. 41, pp. 339-364.
- García, C. sometido. Datación por Fotoluminiscencia de algunas Formaciones Superficiales del Llano de Ovejas, Cordillera Central, Antioquia. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT. 121 p.
- Gómez, L. y Sánchez, M. (1999). Prospección Geológico Geoeléctrica para el Corregimiento Llano de Ovejas del Municipio de San Pedro (Departamento de Antioquia). Trabajo de Grado. Universidad EAFIT, Medellín. 97 p.
- González, H. (2001). Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. INGEOMINAS. Bogotá, 241p.
- González, C., Urrego, L.E. and Martínez, J.I. (2006). Late Quaternary vegetation and climate change in the Panama Basin: Palynological evidence from marine cores ODP 677B and TR 163-38. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 234, pp. 62–80
- Hale, M. y Porto, C. G. (1994). Geomorphological evolution and supergene gold ore at Posse, Goias State, Brazil. *Catena*, Vol. 21(2-3), pp. 145-157
- Helmens, K. F. (1988). Late Pleistocene Glacial Sequence in the area of the high plain of Bogota (Eastern Cordillera, Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 67. pp. 263-283
- Helmens, K.F., Rutterl, N.W. y Kuhry, P. (1997). Glacier Fluctuations in the Eastern Andes of Colombia (south America) during the last 45,000 radiocarbon years. *Quaternary International*, Vol. 38-39, pp. 39-48
- Hermelin, M. (1993). Stone Lines in Antioquia, Colombia. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, Vol. 8, pp. 133-156.
- Iriondo, M. (1999). Climatic changes in the South American plains: Records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International*, Vol. 57/58, pp. 93-112
- Johnson, D.L., Domier, J.E.J. & Johnson, D.N. 2005. Animating the biodynamics of soil thickness using process vector analysis: a dynamic denudation approach to soil formation. *Geomorphology*, Vol. 6, pp. 23–46
- Lopez, G.I., Hermelin, M., García, C., Sierra, G.M., Toro, G.E. and Rink, W.J. Sometido. Evaluation of the Evolution of a High Elevation Plateau in the Northern Central Cordillera of the Andes, Colombia, South America: First Optical Ages and Preliminary Results. *Geomorphology*.
- Marchant, R., Boom, A., Behling, H., Hooghiemstra, H., Melief, B., Van Geel, B., Van der Hammen, T. y Wille, M. (2004). Colombian vegetation at the Last Glacial Maximum: a comparison of model- and pollen-based biome reconstructions. *Journal of Quaternary Science*, Vol.19 (7), pp. 721–732
- Maya, H. y González, H. (1995). Unidades litodémicas de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*. Vol.35, Nos. 2 y 3, pp. 1-145.
- Page, W.D. & James, M. (1981). The Antiquity of the Erosion Surfaces and Late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: Implications to Tectonics and Erosion Rates. In: *Revista CIAF*, Vol.6 (1-3): 421-454.
- Porto, C. G. and Hale, M. (1996). Mineralogy, morphology and chemistry of gold in the stone line lateritic profile of the Posse deposit, Central Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 5, No. 1-3, pp. 115-125
- Prescott, J.R. & Hutton, J.T. (1988). Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 14, pp 223-227.
- Rendón, D.A. (2006). Determinación de espesores de saprolito en el Batolito Antioqueño. Informe final para el Banco de la República. Medellín, 56 p.
- Rink, W.J. and Odom, A.L. (1991). Natural alpha recoil particle radiation and ionizing radiation sensitivities in quartz detected with EPR: implications for geochronometry. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 18, pp. 163-173.
- Thouret, J.C., Van der Hammen, T., Salomons, B. and Juvigné, E. (1997). Late Quaternary glacial stades in the Cordillera Central, Colombia, based on glacial geomorphology, tephra–soil stratigraphy, palynology, and radiocarbon dating. *Journal of Quaternary Science*, Vol. 12 (5), pp. 347–369
- Toro, G. (1999). *Téphrochronologie de la Colombie Centrale (Département d'Antioquia et abanico de Pereira). Une approche stratigraphique, géochimique, minéralogique et géochronologique (par ¹⁴C et traces de fission) Thèse présentée par Gloria Elena Toro Villegas pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier-Grenoble. Spécialité: Géologie*, 302 p.
- Toro, G. E. & Hermelin, M. (1990). Stratigraphy of volcanic Ashes from Southern Antioquia: possible paleoclimatic implications. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Vol. 8. pp. 201-217.
- Toro, G. Rendón, D. and Ríos, V. sometido. Geomorphologic frame and morphotectonic analysis of the north of the Central Cordillera of Colombia. *Geomorphology*.
- Toro, G.; Hermelin, M.; Schwabe, E.; Posada, B.; Silva, D.; Poupeau, G. and Restrepo, J.J. (2006). Fission-track datings and geomorphic evidences for long-term stability in the Central Cordillera highlands, Colombia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, supplement, Vol. 145, pp. 1-16
- Torres, V., Vandenberghe, J. and Hooghiemstra, H. (2005). An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogota basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 226, pp. 127– 148
- Van der Hammen, T. and Hooghiemstra, H. (2003). Interglacial–glacial Fuquene-3 pollen record from Colombia: an Eemian

to Holocene climate record. *Global and Planetary Change*, Vol. 36, pp. 181–199

Van Geel, B. and Van der Hammen, T. (1973). Upper quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene Area (Eastern Cordillera, Colombia). *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 14, pp. 9-92

Vélez, M.I., Hooghiemstra, H., Metcalfe, S., Martínez, I. and Mommersteeg, H. (2003). Pollen and diatom-based environmental history since the Last Glacial Maximum from the Andean core Fúquene-VII, Colombia. *Journal of Quaternary Science*, Vol.18, pp. 17-30.

Wilhelm, E. and Essono Biyogo, J. P. (1992). Lode gold exploration in the iron rich surficial environment of Gabon.

Trabajo recibido: abril 18 de 2007

Trabajo aceptado: julio 28 de 2007