

# EL FLUJO DE LODO EN LA REGION DE ARMERO (TOLIMA-COLOMBIA) CARACTERIZACION Y MANEJO INICIAL

DR. DIMAS MALAGON CASTRO

## INTRODUCCION

El 13 de noviembre de 1985, en horas cercanas a la media noche, se produjo en la región de Armero un movimiento masivo, inducido por la actividad del cráter Arenas en el Volcán Nevado del Ruiz el cual afectó cerca de 3 700 habitantes y causó más de 21 000 muertos en el centro urbano. Figuras Nos. 1 y 2.

El fenómeno físico puede ser clasificado como un flujo de lodo por efecto volcánico o lahar húmedo y caliente. El espesor actual del lodo varía de acuerdo con su ubicación y contenido de humedad, mediciones tomadas longitudinalmente (Figura No. 4), 20 días después de la tragedia, permiten estimarlo en un metro promedio para la zona afectada, lo cual, a su vez y grosso modo, lleva a calcular una depositación de 60 millones de toneladas (El valor anotado puede ser sobrepasado, hasta más de 100 millones de toneladas, si se considera el volumen del agua original asociado al mismo), incluyendo la humedad que representaba para esa fecha (promedio cercano al 23%). La extensión longitudinal del flujo fue de 33 km. aproximadamente y su anchura fluctuó, también en forma aproximada, entre 1 y 5 km.

La distribución del flujo se presenta en la Figura No. 4 al igual que su comparación con eventos anteriores, cartografiados mediante criterios geomorfológicos-pedológicos. Los eventos anteriores han sido registrados desde 1595 por Fray Pedro Simón y por Treffry en 1845 (Treffry citado por González, 1986); en este último caso (1845) se calculó un espesor entre 1.8 y 7.3 metros e incluyó un total de 250 millones de toneladas; el fenómeno ocasionó cerca de 1.000 muertes (Treffry, citado por González, 1986). Estos eventos han sido analizados críticamente por Mojica, Brieva, Vallerroel, et al. (1985).

Al comparar las figuras 3 y 4 resulta evidente la similitud del patrón de distribución de dichos eventos, aunque por las referencias anotadas, el correspondiente a 1845 pudo ser cuatro veces mayor que el actual y el de 1595 aproximadamente el doble.

El cráter Arenas en los últimos meses de 1985 y con ligeras diferencias en tiempo, dió origen a fumarolas y emitió variados productos piroclásticos (bombas, lapilli, arenas, cenizas); estos productos afectaron la región y, algunos de ellos (cenizas), alcanzaron grandes distancias (Ubaté, Sierra del Cocuy, zona fronteriza con Venezuela, etc). Estos fenómenos cambiaron la morfología superficial y las características y propiedades de las tierras circundantes

El presente estudio, (informe de Avance a marzo de 1986) tiene como objetivo principal caracterizar los lodos y, en menor detalle y profundidad, las arenas y cenizas, en aspectos físico-químicos, mineralógicos y microbiológicos, para con ello conocer su composición, comportamiento y otros aspectos que puedan influir en su aprovechamiento potencial. En forma complementaria se realizan algunas recomendaciones generales de prácticas sencillas para solucionar algunos problemas detectados

## MATERIALES Y METODOS.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi —IGAC— se le asignaron funciones específicas por el Gobierno Nacional

(Decretos 3850, 3830, 3825, 3824, 3810, 3855) en diciembre de 1985, con la finalidad de definir las áreas afectadas y su grado de deterioro, en relación con la erupción del cráter Arenas en el Nevado del Ruíz.

Con la finalidad de cumplir estas tareas el Instituto tomó fotografías aéreas, realizó levantamientos topográficos, elaboró mapas y efectuó estudios de campo y laboratorio que ayudaran a evaluar cartográficamente la extensión del desastre.

Previamente, el IGAC había actualizado el catastro en Armero, se habían tomado fotografías aéreas y se disponía del Levantamiento Semidetallado de Suelos de la parte plana de los municipios de Armero y Honda, publicado en 1979.

Con el análisis de los documentos resultantes de dichas actividades y la información del medio físico, consignado en algunos de ellos (IGAC, 1979), se procedió a elaborar los mapas, a diferentes escalas, de las zonas afectadas y a caracterizar, en campo, el flujo de lodo.

La actividad de campo incluyó las etapas de comprobación de la fotointerpretación inicial, la elaboración y descripción de calicatas (cortes o perfiles de suelos) y la toma de muestras a diferentes profundidades con la finalidad de caracterizarlas en laboratorio. En algunos casos se obtuvieron muestras de arenas y cenizas volcánicas, estas últimas tanto en Armero como en varios sitios del país.

Las muestras que llegaron al laboratorio fueron sometidas a diferentes tipos de análisis, siguiendo la metodología establecida en el Manual de Laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1973).

La caracterización incluyó.

- Análisis físicos: granulometría, color, punto de saturación, capacidad de soporte (valor  $n$ ), límites e índice de plasticidad, tensiones de humedad y cálculo de las saturaciones respectivas, carbono orgánico, capacidad de intercambio de cationes, cuantificación de materiales amorfos (Fe, Al, Si), fraccionamiento de fósforo y cálculo de la fertilidad.
- Análisis mineralógico: se caracterizó la composición mineralógica de la fracción arenosa (50-250  $\mu$ ) mediante el microscopio petrográfico y la de la fracción arcillosa por medio de rayos x. En algunas muestras, esta última fracción fue analizada por absorción de infrarrojos, a algunas muestras del lodo y de diferentes suelos se adicionaron dos fuentes de bario (sulfatos y cloruros) y, a diferentes contenidos de humedad, fueron estudiadas con rayos x, con la finalidad de comprobar su radio-opacidad.
- Análisis microbiológico: Las muestras para este análisis siguieron los procesos normales de incubación e identificación. Se realizó también la cuantificación de la actividad global, mediante la evaluación del  $\text{CO}_2$  desprendido y se estudió el proceso de amonificación y nitrificación determinando amonio y nitratos.
- Se efectuaron también investigaciones sencillas en el laboratorio tendientes a conocer la capacidad reguladora (buffer) del suelo, adicionando carbono de calcio y midiendo su efecto en el pH y, de respuesta al lavado, aplicando láminas de agua y evaluando en el afluyente tanto la salinidad total como la concentración de sulfatos. Con esta información se establecieron las gráficas respectivas.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La zona afectada por el flujo de lodo se presenta en las figuras Nos. 1, 2 y 4. En ellas se aprecia claramente el patrón del fenómeno tanto actual como pretérito (Figura No. 3). La alta correspondencia del movimiento masivo actual con los anteriores, y posiblemente futuros, define criterios claros para la planificación y ordenamiento territorial de esta región.

La magnitud, principales características y propiedades del lodo son las siguientes:

- Area aproximada afectada severamente 3.700 ha.
- Profundidad promedio del lodo, posterior a su deshidratación: 1m.
- Volumen aproximado en la zona de Armero: 37 millones de m<sup>3</sup>; si se asume una densidad de 1.6 g/cc, el peso aproximado sería de 59.2 millones de toneladas.

Los comentarios que se presentan a continuación hacen referencia a muestras tomadas en forma representativa en el área de influencia de este material, como ya se ha comentado, y a las calicatas estudiadas en el campo y que se ubican en el mapa de la figura No. 4.

#### PROPIEDADES FISICAS:

El resultado de los análisis efectuados se presenta en la Tabla No 1.

- Color: los primeros 30 cm del lodo presentan en la matriz un color pardo grisáceo oscuro (10YR4/2), con abundantes manchas de tamaño superior a 15 mm, definidas y con límite variable (neto a difuso). A profundidades mayores de 30 cm, el color de la matriz adquiere tonalidades grises (10YR5/1), con manchas menores de 2% en la superficie expuesta y de color pardo amarillento (10YR5/6).

Debe anotarse el cambio marcado en color al secarse las muestras y la aparición, entre grietas, de coloraciones amarillentas y rojizas.

- Textura: Los datos granulométricos en las muestras estudiadas (21), indican una composición bastante homogénea, especialmente en lo que hace referencia a la fracción menor de 2 mm. Los porcentajes promedios de las diferentes fracciones son los siguientes: arenas (70.6%), limos (19.2%) y arcillas (10.2%).

La composición de esta fracción no varía espacialmente, lo cual demuestra la energía del medio de transporte y la falta de tiempo para seleccionarse por tamaño. Fracciones mayores de las analizadas, especialmente rocas de gran tamaño, sí presentan selección espacial.

La granulometría total del lahar se caracteriza por su heterometría, composición poligenética, alta cohesión y combinación de clastos angulares y subredondeados a redondeados (Mojica, Colmenares, Villarroel, et al (1985).

- Constantes de humedad: La capacidad de campo, estimada por la tensión a 0.1 bar, tiene valores promedios (20 muestras) de 16.8%.

Los bajos porcentajes de arcilla y de materia orgánica y la falta de estructura [La carencia de estructura determina una permeabilidad muy lenta, una densidad aparente relativamente alta (aproximadamente 1.6 g/cc) y tendencia a favorecer procesos erosivos por acción de la escorrentía.], en el suelo, influyendo sobre esta propiedad

El punto de marchitez permanente presenta un valor promedio (10 muestras) de 7.2%. Como consecuencia de los resultados anteriores, el promedio de humedad aprovechable es de 9.6%. Del complejo de cambio, permite hacer dos interpretaciones posibles:

- La saturación de bases es alta en todos los suelos, debido a la baja CIC y a pesar de los pH promedios (ácidos). Estos indicarían una fuente adicional de acidez (posiblemente asociada al azufre), que no interviene en el contenido ni en la saturación del complejo de cambio.
- El contenido, per se, de las "bases de cambio", por otra parte, se interpreta como bajo (7.3 me/100g, promedio de 21 muestras). Dentro de estos cationes debe destacarse el valor promedio (0.3 me/100 g) de k.

El fósforo presenta contenidos promedios (21 muestras de 48 ppm {P}, los cuales se consideran adecuados para la producción de cultivos. El fraccionamiento del fósforo en el lodo lleva a las conclusiones siguientes (Tablas Nos. 3 y 4).

- El P inorgánico constituye los mayores porcentajes (73) mientras que el orgánico es bajo (27%), ello es válido también para los piroclastos finos (arenas). De estos porcentajes el mayor componente es el P ligado al Ca (44%), mientras que el asociado con Al es bajo (4%) e intermedio el unido al Fe (22%).

- En los piroclastos es aún mayor el P asociado al Ca (63%) y mucho menor el vinculado con el Fe (12%). El nitrógeno, en su forma asimilable por las plantas, se presenta bajo (Tabla 11); ello se debe a:
  - Bajos contenidos de materiales orgánicos; promedio en capas superficiales (9 muestras) de 0.4% (C.O.).
  - Predominio dentro de los microorganismos, de bacterias anaerobias con baja actividad (medida por desprendimiento de CO<sub>2</sub>) y baja o nula actividad nitrificante, asociada a las características del medio.

Las formas amoniacales son dominantes, pero sus concentraciones son bajas.

En síntesis, la fertilidad actual del lodo, se aprecia como baja. Los cuatro factores que más influyen en esta apreciación son: alta acidez, bajo contenido de materiales orgánicos y de nitrógeno, valores bajos de las "bases" de cambio y salinidad ligera; el fósforo y el potasio no se consideran limitantes. La fertilidad potencial se comentará al tratar las características mineralógicas de los lodos y de las cenizas volcánicas contaminantes.

Los elementos menores no han sido determinados en el Laboratorio de Suelos del IGAC; no obstante, la mineralogía presente, las fuentes de los materiales y las condiciones químicas del medio permiten asumir, por lo menos para Cu, Zn y Mn, contenidos no limitantes para la nutrición vegetal. En el caso del Fe evidencias de campo pueden asociarse a contenidos elevados; estas apreciaciones concuerdan con las determinaciones efectuadas por Frye (1986).

En la Tabla No. 5, se incluyen los resultados obtenidos por el Instituto de Asuntos Nucleares, en relación con diferentes elementos del lodo, aguas y tejidos vegetales.

- Salinidad: El análisis de salinidad de los lodos indica (en 21 muestras) una conductividad eléctrica promedio de 3.7 mmhos/cm., lo cual permite ubicar los suelos como ligeramente salinos, hecho especialmente importante en relación con las plantas susceptibles a las sales, Tabla No. 6.

La saturación de sodio no alcanza valores altos, el promedio es de 3.6% en 21 muestras. Las sales predominantes son sulfatos y cloruros de calcio y magnesio, con dominancia de las primeras. Los bicarbonatos se presentan en cantidades bajas y no se detectaron carbonatos.

Si bien el contenido en sodio es inferior al del calcio o magnesio, resulta superior al del potasio y, en algunos casos, adquiere valores medianos a altos (muestras 2, 4 y en la superficie de la 8; ver sitios de muestreo en la Figura No. 4).

En las figuras 5 y 6, se consignan los resultados obtenidos, en condiciones de laboratorio, tendientes a ilustrar medidas correctivas en cuanto a sales y acidez.

La Figura No. 5, indica la relación existente entre la cantidad de agua aplicada, para una profundidad de 15 cm., de suelo y las diferentes concentraciones de sales solubles, con especial referencia a los sulfatos (sales predominantes). Se concluye que este tipo de práctica (aplicación de láminas de lavado) fácilmente elimina uno de los problemas vigentes en la actualidad. La reserva potencial o los nuevos aportes de sales, ya sea a través de sedimentos o de agua con contenidos altos en azufre, resalinizarán el lodo y harán recurrente el proceso.

El descenso en la conductividad eléctrica, 6.5 mmhos/cm a 1.5 mmhos/cm, se obtiene con láminas de 15 cm. teniendo en cuenta que en la prueba realizada se utilizaron columnas de suelo de 15 cm de longitud. En forma similar, la concentración de sulfatos disminuye de 63 me/1 a 15 me/1, con la lámina anotada. El agua requerida para el lavado de las sales puede provenir de las fuentes asociadas al riego o depender de las lluvias (Figura ); éstas, de acuerdo al balance hídrico (Tabla 7) permiten, por exceso, disolver y lavar las sales. siempre y cuando se asegure un buen drenaje.

- La Figura 6, muestra la respuesta del lodo a diferentes aplicaciones de cal. En este aspecto es interesante anotar que, debido a las condiciones en que se realizó la experimentación, especialmente en cuanto a humedad y temperatura, los resultados obtenidos deben aproximarse bastante a la respuesta real en el campo, por unidad de peso del lodo. Aplicaciones entre 2 y 3 Ton/ha. de cal agrícola parecen ser las más adecuadas para corregir aspectos de acidez en la capa arable del suelo. No obstante, como en el caso de la salinidad, la reserva en azufre

del medio aportará nuevamente fuentes de acidez, con lo cual, hasta que ella no se elimine, las prácticas de neutralización deberán ser constantes.

En la figura 8, se resumen gráficamente los aspectos químicos relevantes del lodo, sus orígenes, evolución y prácticas de manejo más aconsejables

### **CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS:**

Las características mineralógicas que se presentan en las Tablas 8 y 9 y que se comentan a continuación, hacen referencia tanto a la fracción arenosa (50-250  $\mu$ ), como a la arcillosa (2  $\mu$ . en diámetro), del lodo en la zona de Armero. Sólo de una manera informativa y general, se presentan resultados parciales de las cenizas volcánicas emitidas por la erupción del volcán o colectadas en Boyacá y en la Sierra Nevada del Cocuy, como referencia a su posible influencia sobre los suelos y debido a que, indudablemente, están conformando también parte del lodo en la zona de Armero. .

El flujo de lodo por efecto del volcán (cráter Arenas) o Lahar húmedo, presenta las siguientes características mineralógicas:

- En su fracción dominante, la arenosa, analizada en subfracciones (inferior a 2.89 g/cc) y densa o pesada (superior a 2.89 g/cc) está constituida así

#### **Fracción liviana (promedio de 11 muestras)**

Feldespatos = 40.4% (predominio de plagioclasas)

Cuarzo = 28.6%

Vidrio volcánico = 19.3%

Granos alterados = 4.5%

Agglomerados (matriz vítrea y minerales anisotrópicos en ella) = 6.3%

Fragmentos líticos, fitolíticos, etc = 0.9%

#### **Fracción Densa (promedio de 11 muestras)**

Piróxenos = 59.8%

Anfíboles = 9.1%

Muscovita = 10.9%

Biotita = 3.0% micas (16.9%)

Clorita = 3.0%

Granos alterados = 7.9%

Opacos = 4.8%

Epidota = 1.0%

Otros (granate, turmalina, circón, piróxenos y anfíboles recubiertos por vidrio) = 0.5%

La fracción arcillosa está integrada (análisis de 12 muestras, Tabla 9), fundamentalmente por:

Montmorillonita (15-30%)

Amorfos (?) (15-30%)

Micas y caolinita (5-15% c/u)

Feldespatos, materiales interestratificados, clorita y cristobalita (menos de 5% c/u).

Los resultados mineralógicos permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- Se presentan minerales influenciados por cenizas y otros productos piroclásticos, en los cuales el grado de alteración es bajo
- La mineralogía característica se asocia con fuentes de elementos (nutrientes), lo cual resulta en un grado moderado a alto de fertilidad potencial.
- En la fracción arcillosa, el predominio de montmorillonita y algunos amorfos, hace también referencia a su origen volcánico efusivo y, especialmente, a la transformación del vidrio y de los feldespatos en productos amorfos y, la de los minerales micáceos, en montmorillonita. No obstante, esta última puede formarse también mediante síntesis, en condiciones pedológicas específicas.

En relación con los minerales amorfos los resultados analíticos (Tabla 10) indican el predominio de los correspondientes al  $\text{SiO}_2$ , con bajos contenidos en cuanto a hierro y aluminio. Ello determina un potencial alto de cementación y posible formación de capas endurecidas, si no se contrarresta su acción con prácticas de manejo de tierras (aradas a diferentes profundidades, incorporación de materiales orgánicos, etc.).

La comparación de los resultados con los contenidos de estos materiales en otros suelos del país indican su bajo tenor en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y valores mayores en  $\text{SiO}_2$  que en los suelos alterados de los Llanos Orientales, pero inferiores a los suelos derivados de cenizas volcánicas en Cundinamarca.

La importancia adicional de estas relaciones, especialmente entre compuestos del Si y Al estriba en favorecer la síntesis o no de arcillas o de otros productos (gibbsite si no hay sílice, materiales silíceos si no hay alúmina, o alofana y arcillas de diferente naturaleza si se presenta alúmina y sílice).

Análisis mineralógicos efectuados en algunas muestras de arenas volcánicas en la región de Armero, muestran un predominio de feldespatos (39%), vidrio volcánico (37%) y piróxenos (16%) sobre los demás componentes, aglomerados (5%), opacos (3%), biotita y circón (trazas). En el análisis de la muy poca fracción arcillosa dominan los amorfos, encontrándose solamente trazas de cuarzo, feldespatos, cristobalita, haloisita, caolinita y gibbsite.

El análisis realizado en algunas muestras de cenizas volcánicas en la región de Chiquinquirá y en la Sierra Nevada del Cocuy (Los análisis mineralógicos fueron realizados por el doctor Carlos Pulido, de la Sección de Análisis Especiales del IGAC), muestran las siguientes características:

- En la fracción gruesa de las arenas predominan los feldespatos, plagioclasas fundamentalmente, aproximadamente 40%, piroxenos hiperstena, agirina y posiblemente augita, aproximadamente 30%, vidrio: shards, esquirlas y rebordes magmáticos, aproximadamente 20% y de naturaleza "ácida". Otros minerales como cuarzo, materiales alterados, fragmentos y productos devitrificados, opacos, biotita y anfíboles, se presentan en pequeños porcentajes o como "trazas".
- A medida que la fracción disminuye en tamaño, aumenta el porcentaje de los materiales amorfos, vidrio volcánico (50-70%), presentándose también feldespatos: plagioclasas (5-15-25%) y cantidades mucho menores de opacos, alterados, biotita y cristobalita.
- La composición de las cenizas y los datos preliminares sobre su composición química permiten clasificarla como de composición intermedia, es decir no "ácida" ni "básica".  
Contenido total de  $\text{SiO}_2$  cercano al 60-65%, de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  al 14-20%, de CaO y FeO, cercanos al 4-5% cada uno. Estos porcentajes concuerdan, en términos generales, con los presentados por Arcila y Valencia (1985), en cenizas del Ruiz, en septiembre de 1985 y por Katsui, Takahashi, Agashiro et al (1986), estos últimos informan de composición andesítica en los productos piroclásticos, con valores altos en la relación Mg/Fe, riqueza relativa en  $\text{K}_2\text{O}$  y características altamente silíceas en el vidrio (composición riolítica).

Los análisis químicos de elementos asimilables por las plantas y algunas características relacionadas con la influencia agrícola de estos materiales son:

- pH variable, más ácida (4,4-4,5) cercano al volcán y casi neutro (6,3) en localidades más alejadas (Boyacá).
- Capacidades de intercambio muy bajas (3,4 me/100 g).
- Contenido variable en nutrientes, especialmente en P y bases de cambio.
- En algunos casos las cenizas volcánicas causaron daños al caer sobre plantaciones (Arcila y Valencia, 1985).

Los análisis de arenas en Armero y Boyacá permiten deducir:

- El contenido de P (27 a 29 ppm) en la arena volcánica de Armero, aumenta considerablemente para la zona de Ubaté-Chiquinquirá (80 ppm).
- Otras características tienden a ser similares (capacidad de intercambio baja al igual que las bases totales y la salinidad).

Se ha evidenciado respuesta favorable de la cobertura vegetal a las cenizas y a la arena volcánica especialmente después de algunas lluvias, podría asociarse con los aportes de fósforo y posiblemente de S. este último a través del arrastre y de la contaminación con las fuentes mismas (fumarolas) y con la atmósfera.

## **CARACTERIZACION MICROBIOLOGICA GENERAL:**

Los resultados de la caracterización microbiológica general (Investigación realizada por la Bióloga Luz Stella de la Torre (IGAC)), se presentan en las Tablas Nos. 11 y 12 y en la Figura 9.

Con base en los resultados anotados se pueden hacer las siguientes interpretaciones y comentarios:

- Existe dominio de la población bacteriana sobre las demás (hongos y actinomicetes), existiendo poca diversidad pero alto número de organismos

Su mayor representante es el orden Eubacterial donde abundan bacilos Gram positivos y Gram negativos. Las Familias Bacillaceae y Enterobacteriaceae se encuentran en gran cantidad y en todas las muestras analizadas.

- En relación con hongos, se constató su baja proporción, dominando los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*. Las familias y géneros encontrados se presentan en la Figura 9; algunos de ellos son importantes en sus relaciones médica.
- Se presentaron también abundantes colonias de levaduras, Actinomicetes y *Streptomyces*. Las poblaciones de Actinomicetes son muy esporádicas y se presentan en muy pocas muestras analizadas; estos organismos son sensibles a los cambios de los factores ambientales.
- Del resultado de algunas funciones, como la actividad global (determinada por desprendimiento de  $CO_2$ ) se comprobó que es escasa o casi nula, relacionándose con el predominio de organismos Anaerobios y las condiciones poco favorables del medio (acidez, anaerobiosis y temperatura, especialmente en la etapa que originó el flujo).

La actividad nitrificante es también baja y, en algunas muestras, prácticamente nula; esto puede explicarse, por las razones anotadas previamente, especialmente por el pH ácido. El amonio, por su parte, alcanza mayores cantidades, dada su menor sensibilidad a la influencia que tienen sobre su dinámica los cambios ambientales.

- Se encuentran grandes cantidades de especies bacterianas nativas y se constataron también organismos relacionados con contaminaciones recientes: varias especies de *Clostridium*, entre ellas *Clostridium tetani*, *botulinum*, *perfringens* y otros agentes causantes de enfermedades en humanos. Si bien, algunos de estos microorganismos se eliminan rápidamente, otros (*Clostridium*) pueden perdurar generando amenazas a los hospederos potenciales.

## **SINTESIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La comparación de los eventos pretéritos con el flujo reciente de lodo en la zona de Armero, presentados en las Figuras 3 y 4, indica que se trata de fenómenos naturales, relativamente comunes dentro del marco de evolución geomorfológica de la tierra y de cuya acción se derivan materiales que favorecen rápidamente la formación de suelos.

La estabilidad de las formas asociadas con estos eventos, su evolución posterior y el tiempo que transcurren entre ellos constituyen criterios para planificar la utilización de las superficies que originan, ya sea como asentamientos humanos o como tierras cultivables.

La comparación de algunas características y propiedades de los suelos resultantes de eventos pasados, especialmente del ocurrido en 1845, con los sedimentos actuales, permite generar criterios útiles tanto para conocer la potencialidad de las tierras desde un punto de vista agrícola, como para deducir procesos evolutivos de los suelos.

Previamente (IGAC, 1979) se han presentado las características y propiedades químicas, físicas y mineralógicas de los suelos y del lodo que los sepultó. Debe aclararse que para la comparación se utilizan los datos disponibles de los

conjuntos Limonera y La Vuelta (59% de los suelos del área del abanico aluvial, hoy sepultado por el lodo), en relación con el promedio de los resultados analíticos y de campo de muestras del lodo actual.

Con base en esta comparación, resaltan las siguientes conclusiones:

#### Composición Mineralógica

En el informe del IGAC (1979) sobre los suelos de la zona de Armero, se presentan los resultados analíticos del principal suelo de la zona (Limonera), que abarcaba el 40% de la misma

Al comparar estos resultados con los encontrados para el lodo actual, sobresalen las siguientes diferencias:

- Si bien ambos cuerpos presentan minerales alterables, aún en el caso del suelo sepultado, asociados a grados bajos de alteración, es evidente la transformación sufrida por el suelo limonera evidenciada por:  
Fracción arena. Alteración del vidrio volcánico y de los feldespatos. el lodo presenta 19.3% de vidrio y 40.4% en feldespatos, comparado con 7% y 29%, respectivamente, del suelo enterrado.  
Los grandes alterados aumentan en el suelo sepultado notoriamente (43.7%) si se comparan con los del lodo (4.5%)

En la subfracción densa las transformaciones mayores se han realizado dentro de los piroxenos, en el lodo se presentan en proporción del 59.8% y en el conjunto Limonera sólo en 9.3%. En el caso de los anfíbolos se presenta una disminución, aproximadamente a la mitad de su contenido (9.1 contra 5%). En el lodo, el contenido en micas es mucho más pronunciado (16.9%) que en el suelo sepultado (trazas a 4%).

Fracción arcillosa. En el suelo sepultado predominan los materiales amorfos sobre los cristalinos, esencialmente integrados por Montmorillonitas; en cambio, en el lodo, las cantidades y relaciones entre ellos son equivalentes (15-30% de c/u). Es muy posible pensar en el origen de los materiales amorfos del suelo como resultado de la transformación de vidrio volcánico y, en menor proporción, de los feldespatos inicialmente presentes en el material que originó el suelo sepultado.

- Las diferencias encontradas permiten inferir que las condiciones para el proceso de transformación son relativamente altas, en función del clima de la zona, con el consiguiente aporte de nutrientes al medio y la constitución de materiales de alteración (amorfos y compuestos alterados). No obstante, el grado de transformación del suelo sepultado, en su conjunto, era aún incipiente (evidenciado por la presencia de plagioclasas, vidrio y piroxenos en porcentajes altos), lo cual está acorde con el poco tiempo sufrido de evolución, a pesar de la agresividad climática existente (Figura 7)
- Las características mineralógicas del lodo permiten predecir una fertilidad potencial relativamente alta, con base en el alto contenido en plagioclasas, piroxenos, anfíbolos, micas y vidrio volcánico, bajo las condiciones del clima actual. Debe señalarse, no obstante, un aumento en materiales amorfos, con las implicaciones que determinan sobre la fertilidad actual del suelo (fijación de fosfatos). La influencia de éstos, asociada a su carácter radio-opaco, fue evidente en los hospitales, al tomarse radiografías a pacientes que habían ingerido lodo y queda claramente expresado en la Figura No. 10. En ella se manifiesta la opacidad de la muestra de lodo, comparada con las de otros suelos, aún tratados con cloruros y sulfatos de bario en cantidades altas.

#### Características y propiedades físicas

- El flujo de lodo, como ya se anotó, presenta una composición granulométrica, referida a su tierra fina, con predominio casi constante de las arenas (71%) y sólo 10% de arcillas. Los análisis de los suelos sepultados indican aproximadamente 63% de arenas y cerca al 16% de arcillas.

La similitud entre los valores es notoria y las diferencias parecen asociarse al proceso de alteración, el cual al actuar sobre materiales lábiles fomenta el aumento en la fracción arcillosa. La comparación con fragmentos gruesos (mayores a las arenas) es más difícil, debido a la evidencia de los actuales, no así en los suelos enterrados, donde las prácticas culturales (despiedre) dificultan la comparación.



- La humedad aprovechable por las plantas, tomando como parámetro los contenidos de humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente es ligeramente inferior en el lodo (9.6%) comparada con los análisis disponibles de los conjuntos Limonera y La Vuelta (60% del área con valores entre 10.5 y 13.3%). Tanto los valores de Capacidad de Campo como del Punto de Marchitamiento Permanente son menores en el lodo (16.8 y 7.2%, respectivamente) comparados con los de los suelos sepultados (21.1 a 27.2% y 8.1 a 9.9%, respectivamente)
- No se presentan valores que puedan ser comparados en relación con densidades, porosidad, índices de plasticidad y valor n
- El color, tanto de los suelos sepultados como del lodo, se caracteriza por presentar dominancia del negro y estar afectado por manchas hidromórficas

#### Características Químicas:

Las principales características químicas que permiten comparación con los suelos sepultados son.

- pH. La acidez se incrementa notoriamente en el lodo (pH 4.3 promedio) si se compara con la de los suelos enterrados, de los cuales solo el Conjunto Limonera manifiesta características ácidas (pH 4.2 a 5.4), mientras que los demás integrantes de la Asociación se acercan a la neutralidad (pH 6.1 - 7.1)

El aluminio de cambio promedio en el lodo es de 0.6 me/100g con una saturación, también promedio, del 7.3%. Ello contrasta con el del suelo sepultado en el cual el aluminio varía entre 0.2 y 1.6 me/100g; la saturación del complejo varía entre 1.7 y 4.4% en horizontes superficiales y 16.3% en profundidad.

La saturación de bases presenta interpretaciones variables, ya que en el lodo es alta, a pesar del pH ácido, debido a la baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Similar comportamiento se encuentra en el suelo sepultado (Conjunto Limonera).

- Materia orgánica. Los suelos sepultados tienen un contenido de 1.8% de Carbono Orgánico en los horizontes A y 0.27% en los B y C. En el lodo el contenido es sensiblemente inferior (0.2 - 0.4% de Carbono Orgánico) en las muestras analizadas
- La capacidad de Intercambio de Cationes (CIC). La CIC es inferior en el lodo (promedio de 9.1 me/100g) comparada con la del suelo sepultado (14.6 me/100g. en horizontes A y 10.4 me/100g en los horizontes Bw). Esto fundamentalmente se relaciona con su menor evolución y menor porcentaje tanto de arcillas como de materiales amorfos y orgánicos.
- Fertilidad General: La fertilidad actual del lodo ya se ha comentado previamente. Aparte de los problemas de acidez y salinidad, el contenido de elementos (P, K, Ca, Mg) está en rangos medianos a bajos. El principal nutriente mayor que se considera limitante es el nitrógeno.
- Salinidad. En los suelos sepultados la salinidad (Conductividad eléctrica. 1.8 - 2.9 mmhos/cm) sólo se presenta en forma ligera en el Conjunto Limonera. En el lodo los valores son superiores (promedio de 3.7 mmhos/cm.) Ello se atribuye a la contaminación e influencia del azufre (S) cuyas sales (sulfatos) dominan entre las que lo afectan  
El sodio (Na) en el lodo alcanza valores promedios de 3.6 (PSI), mientras que en el Conjunto Limonera fluctúa entre 3.7 y 5.8

Con base en los comentarios hechos, se han detectado las similitudes y diferencias entre los suelos sepultados y el lodo. En la actualidad, se estudian las respuestas del lodo a fertilizantes, bajo condiciones de invernadero. Se ha constatado la influencia nociva de las sales y, posiblemente de diferentes agroquímicos, sobre el desarrollo de plantas testigos (lechuga, rábano) y la respuesta a prácticas de lavado y eliminación de las mismas, aún sin corrección de la acidez. La contaminación con agroquímicos no ha sido estudiada por el Instituto Geográfico.

Se recomienda continuar el seguimiento de las características estudiadas a medida que cambian las condiciones del medio y en especial aquellas que, como las microbiológicas, constituyen indicadores valiosos de la respuesta inicial a procesos evolutivos de singular importancia práctica

Por otra parte, la investigación ya en condiciones de campo, y al tener en cuenta lo que se ha estudiado hasta el presente, definirá y afinará varios temas que sólo se han iniciado como punto de partida para la recuperación agropecuaria de la zona.

La selección y adaptación de especies y variedades de cultivos y pastos a la zona afectada y ya caracterizada, constituye, en nuestro concepto, el programa a seguir para la rehabilitación agropecuaria de la región.

Las prácticas de preparación de tierra y, en especial, las técnicas para el desarrollo y mantenimiento de la estructura del futuro suelo, deben constituir objetivos prácticos íntimamente relacionados con el punto anterior, referido a la selección y adaptación de especies

## **RESUMEN**

El trabajo investigativo realizado tuvo por objetivos caracterizar los componentes ecológicos del área de Armero y el lahar húmedo y cálido que destruyó la ciudad y sepultó suelos aledaños. Con ello, se buscó establecer relaciones explicativas entre varios fenómenos naturales que se han sucedido en la región y señalar aspectos básicos para la recuperación agropecuaria de las tierras.

La investigación se efectuó mediante el análisis de la información existente y el estudio de campo correspondiente, 20 días después del fenómeno. Su caracterización incluyó parámetros físico-químicos, mineralógicos y microbiológicos en el laboratorio, siguiendo la metodología analítica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Los resultados indican que dentro del contexto ecológico (bosque seco tropical, intervenido agriculturalmente, con alta temperatura y precipitación de 1750 mm de repartición bimodal, sobre abanicos con materiales sedimentarios del Holoceno), el lodo evolucionará de manera muy similar a como sucedió en eventos pasados y generará en corto tiempo suelos productivos, siempre y cuando se someta a un manejo adecuado (eliminación de sales, encalado, fertilización, etc.).

Las principales características del lahar, se relacionan con el origen múltiple y heterométrico de sus constituyentes, sobre selección, coloraciones grisáceas en húmedo y amarillentas y rojizas en seco, baja plasticidad, capacidad adecuada de soporte, al igual que de la humedad disponible para las plantas. Su agregación y desarrollo estructural es inexistente. En la mineralogía de sus componentes arenosos dominan los feldespatos, cuarzo, vidrio riolítico, aglomerados, piroxenos, anfíboles y micas, las arcillas dominantes son de tipo expandible y se presentan materiales amorfos especialmente a base de sílice. Las características químicas indican alta acidez, abundancia de sales (sulfatos y cloruros), bajos contenidos orgánicos, baja a moderada capacidad de intercambio y fertilidad baja en la actualidad y potencialmente moderada a alta en el futuro. El lodo no presenta radiactividad. La microbiología del lodo se caracteriza por presentar un predominio de población bacteriana sobre la de los hongos y actinomicetes; su actividad global y nitrificante es muy baja. Las colonias de levaduras y *Streptomyces* son abundantes. Los actinomicetes son esporádicos y poco frecuentes.