

# Fotointerpretación y Dinámica del Deslizamiento en el Relleno Sanitario de Doña Juana, Bogotá - Colombia

JUAN MANUEL MORENO-MURILLO

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Bogotá.

E-mail: mamoreno@ciencias.unal.edu.co

MORENO-MURILLO, J.M. (2001): Fotointerpretación y Dinámica del Deslizamiento en el Relleno Sanitario de Doña Juana, Bogotá - Colombia.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 26, pp. 153-175, 8 Figs., 1 Lámina, Bogotá.

## RESUMEN

La micro-cuenca de la Quebrada El Mochuelo, al suroccidente de la Ciudad de Bogotá, está parcialmente ocupada por el relleno sanitario de Doña Juana, donde el 27 de septiembre de 1997 se presentó un flujo rotacional - translacional de basuras que formó lóbulos superficiales hacia la base. Fue un movimiento en masa de aproximadamente 800.000 m<sup>3</sup> de basuras hacia el río Tunjuelo, la mayor cuenca hidrográfica del suroriente de la Sabana de Bogotá. En la parte activa del relleno sanitario, denominada zona 2, a la fecha del movimiento se depositaban los residuos sólidos, domésticos, industriales y hospitalarios provenientes de la ciudad y de algunos municipios vecinos, alcanzando en promedio las 5000 toneladas diarias. En este relleno se han realizado monitoreos para la producción de gas y lixiviados, pero poco se conoce en cuanto a la estabilidad de la masa de basuras apilada a considerables alturas con respecto al nivel base del río Tunjuelo.

Con base en análisis de fotografías aéreas históricas y las tomadas después de ocurrido el evento, información secundaria y control de campo, se presenta una descripción de los aspectos geológicos, geomorfológicos, morfodinámicos, evolución y estabilidad del relleno y análisis de amenazas en la cuenca. La región seleccionada para el depósito de las basuras no cumple con todas las especificaciones establecidas a nivel internacional para ser utilizada como un relleno sanitario, y presenta zonas bajo amenaza y en condiciones de riesgo que no garantizan una estabilidad bajo un ambiente óptimo.

Palabras clave: *Flujo de basuras, Relleno Sanitario Doña Juana, Deslizamiento rotacional, Deslizamiento translacional, Morfodinámica, Amenaza ambiental.*

## ABSTRACT

The El Mochuelo creek micro-basin, located southwest of Bogotá, is occupied by Doña Juana landfills, where a rotational and translational mass movement with garbage flow produced lobes toward its base in September 27 of 1997. The rotational and translational slide contained approximately 800.000 cubic meters of garbage, and runs towards the Tunjuelo River, the greatest fluvial basin, southeast of the Sabana de Bogotá. Doña Juana landfills are being used since November 1<sup>st</sup> of 1988 and are used until August 14<sup>th</sup> of 2000, assuming that on the two zones, all industrial, domestic and hospital wastes from Bogotá and some neighboring towns, will amount 5000 tons average daily. Based on aerial photographs before and after the rotational slide, secondary information and fieldwork control, a description on the geology, geomorphology, morphologic and dynamic aspects and stability evolution of the landfills and analysis about the risk in the micro-basin have been done. Therefore this region does not perform the specifications established by international organizations for being used as a landfill; besides this generates dangerous zones for environmental stability.

Keywords: *Garbage Flow, Doña Juana Landfills, Rotational Slide, Translational Slide, Environmental Risk.*

## INTRODUCCIÓN

El 27 de septiembre de 1997, al sur del Distrito Capital

de Bogotá, en la denominada zona 2 del relleno sanitario de Doña Juana y a lo largo del cauce de la Quebrada Yerbabuena, se presentó un flujo de basuras de tipo

rotacional en la cabecera y traslacional a la base, generándose lóbulos en el pie del talud que taponaron y represaron el cauce del río Tunjuelo.

Se emplea el término "flujo de basuras rotacional a traslacional" debido a que fue un movimiento en masa complejo de un gran volumen de basuras inconsolidadas que se desplazaron pendiente abajo ayudadas por el alto contenido de fluidos y gases acumulados dentro de ella, interpretación dado por BATES & JACKSON (1987 pg. 249), como se analiza más adelante en el aparte dedicado a la descripción de la dinámica del flujo.

El análisis de fotografías aéreas históricas y las tomadas después del flujo de basuras, la información secundaria y las visitas de campo, permiten hacer una descripción detallada de los aspectos morfodinámicos del evento. En el área se observa continuidad estructural de las unidades, tanto estratigráficas como de paisaje. Las principales variaciones se encuentran en la distribución de los diferentes cuerpos sedimentarios cuaternarios y su comportamiento ante los procesos morfodinámicos que afectan la estabilidad por factores erosivos, pendiente, uso del suelo, manejo del drenaje, manejo de lixiviados y la dinámica del flujo de basuras.

En el relleno no se han realizado adecuados controles en cuanto a la estabilidad de la masa de basuras apilada a manera de capas y a alturas considerables con respecto al nivel base, que en este caso corresponde al río Tunjuelo. En las últimas décadas la extracción de materiales de arcilla para la producción de ladrillo ha afectado la estabilidad de la parte media de la cuenca de la Quebrada Mochuelo, y recientemente la extracción de materiales pétreos para agregados, ha modificado notoriamente la parte baja, en la confluencia de la quebrada con el río Tunjuelo, que quedó cubierta con basuras. El avance del urbanismo y su actividad antrópica en cercanías al relleno ha intensificado el impacto sobre la región y éste a su vez sobre la población.

## LOCALIZACION DEL RELLENO

El relleno sanitario y su zona 2, donde se presentó el flujo, se ubica en el flanco occidental del sinclinal de Usme, en la parte suroriental de la cuenca de la Quebrada Mochuelo que drena al río Tunjuelo, cubriendo los valles de las quebradas Puente Blanco, Botello, Yerbabuena y Mochuelo, área de la Vereda Mochuelo Bajo del municipio anexo de Usme que para el año de 1986 se consideraba en las afueras del perímetro urbano de la ciudad capital (Fig. 1).

Fisiográficamente es una depresión (Depresión de Mochuelo) que presenta zonas con alta pendiente en la parte

alta y semiplanas y bajas en la llanura aluvial del río Tunjuelo en el sitio Cantarrana, formando niveles agradacionales de terrazas y conos de deyección. Esta depresión está limitada por zonas montañosas así: Al oriente, las laderas montañosas del sinclinal hacen parte de la unidad morfológica estructural plegada, con pendientes que alcanzan los 45° en los cerros de Doña Juana y el Campanario, formados por rocas estratificadas de la Formación Areniscas de La Regadera. Al occidente y al sur, limita con laderas fuertes que forman la divisoria de aguas con la cuenca del río Soacha. La depresión de Mochuelo está conformada en el subsuelo por arcillas terciarias de la Formación Bogotá sobre la cual se encuentra el relleno sanitario (Figs. 2a y 2b).

El patrón de drenaje principal es paralelo a sub-paralelo, formado por las quebradas Zo Grande, Mochuelo, Botello, Puente Blanco, Yerbabuena y otras menores. Por la zona oriental de la cuenca se encontraba el cauce de la quebrada Puente Blanco, hoy cubierto por el relleno sanitario, y que drenaba directamente al río Tunjuelo. El lecho de la quebrada Puente Blanco está conformado por material de tipo torrencial, formando un cono de deyección. Existe otro afluente ubicado más al sur, que drena desde la loma El Campanario y la porción más sureste de la zona del relleno. En general utilizan el nombre de Quebrada Yerbabuena para estos cauces, pero son independientes de la red de drenaje principal. A lo largo de la Quebrada Puente Blanco, que corresponde a un cauce intermitente que corta las rocas de la Formación Areniscas de La Regadera, se presentó el flujo de basuras (Fig. 2b).

La Quebrada Mochuelo drena al río Tunjuelo, con dos canales a lado y lado de otro gran cono de deyección cuaternario, interpretado anteriormente como de origen fluvioglacial (JULIVERT 1961a, ACOSTA & BELTRÁN 1987). Este cono fluyó hasta el río en predios de la hacienda Cantarrana (Figs. 2a y 2b), zona prevista por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B), para la construcción de una presa de amortiguamiento para control de crecientes y evitar así las inundaciones en la cuenca baja del río (E.A.A.B. 1987).

Esta red disecta sobre la cubierta de sedimentos cuaternarios erosionados formando cárcavas de grandes dimensiones, especialmente en los valles de las quebradas Mochuelo y Zo Grande, al norte del relleno donde se encuentran chircales en explotación. En general, esta red es más activa en épocas de lluvia ya que tanto las quebradas Yerbabuena, y Botello como otros cauces menores son de carácter intermitente y algunos drenan sobre las areniscas de la Formación Areniscas de La Regadera. Estos cauces han formado conos de deyección claramente identificables

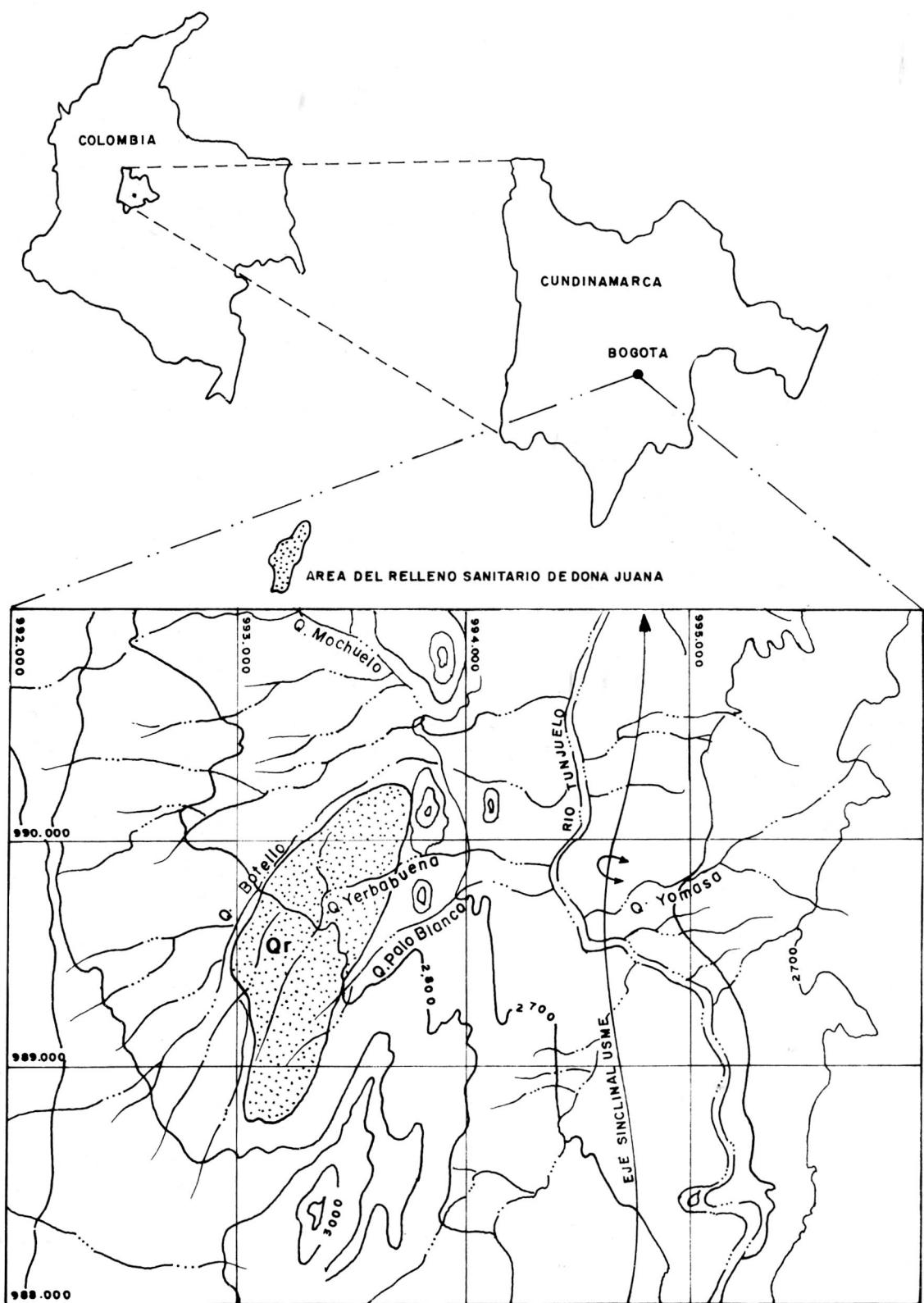


Fig. 1. Mapa de localización del área de estudio, donde se destacan los aspectos fisiográficos y se observa la ubicación del relleno sanitario de Doña Juana, la red de drenaje en la cuenca del Mochuelo, y se aprecia el eje de la principal estructura del área, el sinclinal de Usme-Tunjuelo.

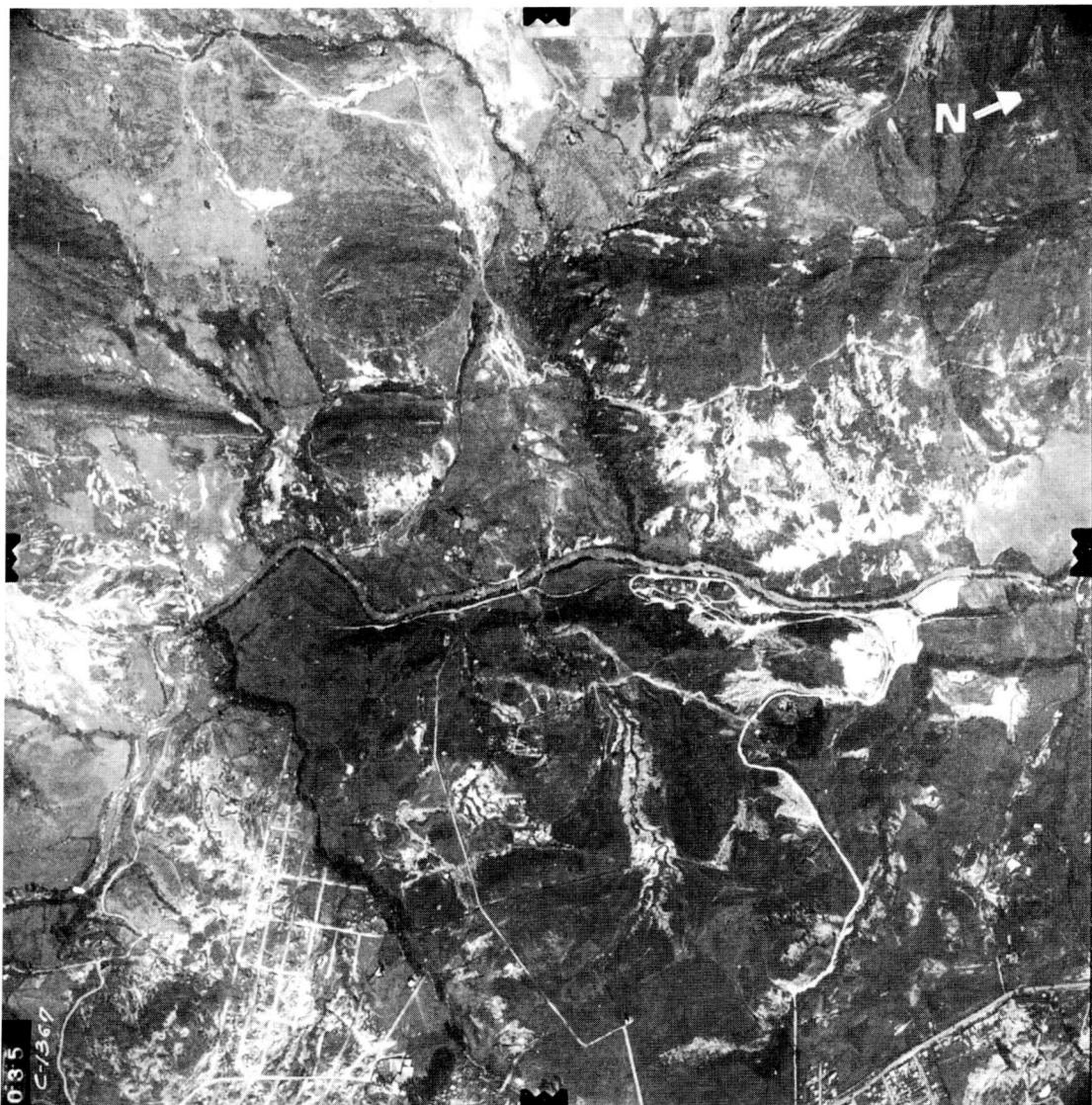


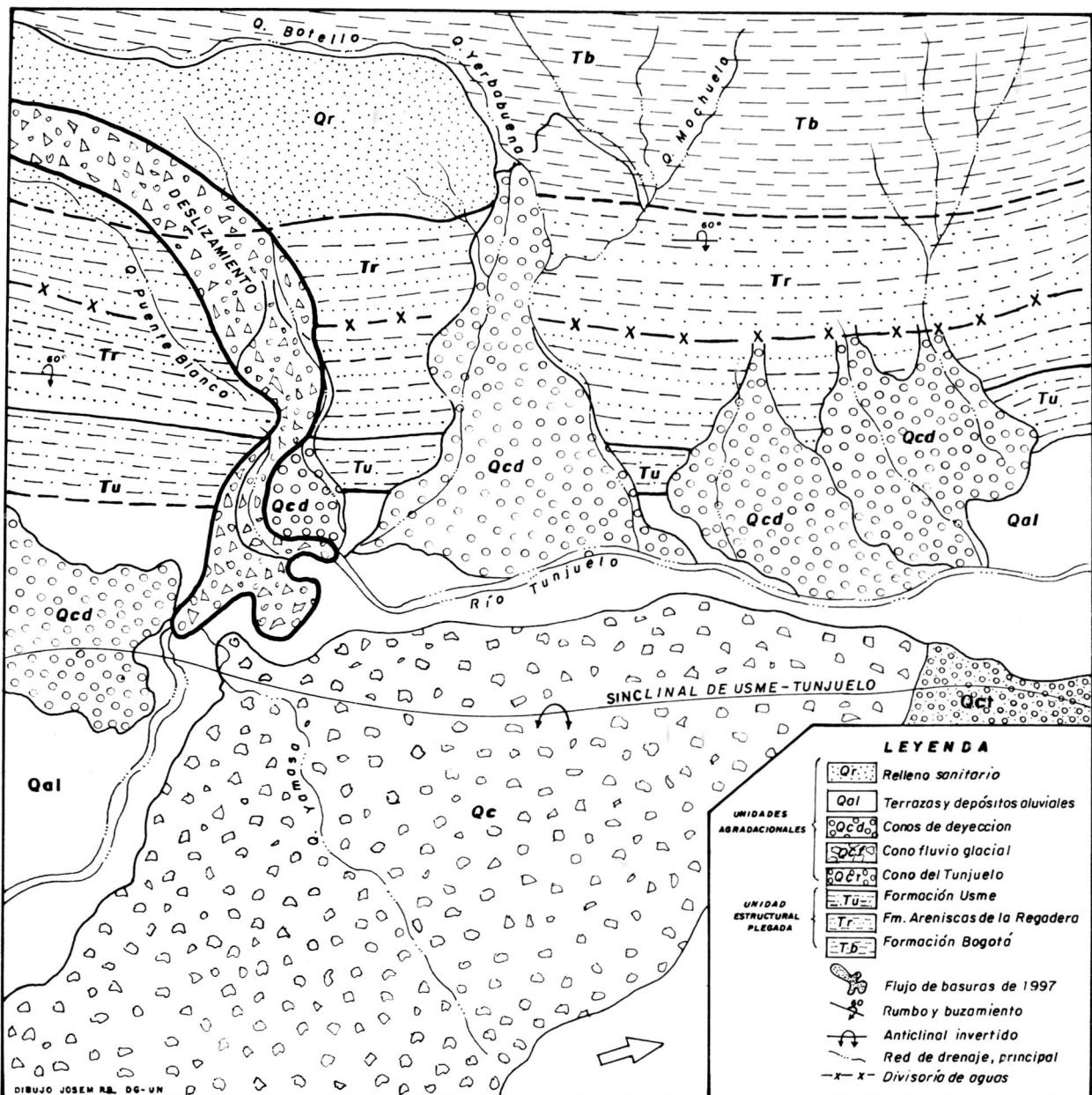
Fig. 2a. Fotografía aérea 035 del vuelo C-1367 del 20 de junio de 1971, a escala aproximada 1:10.000, donde se observa la zona de ubicación del relleno sanitario de Doña Juana; se aprecian los conos de deyección cuaternarios formados en los cauces de las quebradas Puente Blanco, Yerbabuena y Mochuelo, y las unidades terciarias que conforman el flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelo.

en fotografías aéreas así como en campo, evidenciando procesos de remoción en masa muy recientes (Figs. 2a y 2b, Fotografías F y G ).

La zona aledaña al relleno de Doña Juana es un área de expansión urbana donde las condiciones ambientales han sido alteradas notoriamente desde comienzos de siglo por la extracción de materiales pétreos, generándose un intenso proceso erosivo de los depósitos cuaternarios y terciarios, manifiesto por la formación de grandes cárcavas, parcialmente llenas de basuras que se evidencian históricamente en las fotografías aéreas (Figs. 2a y 3).

## ESTRATIGRAFIA

Rocas sedimentarias cretácicas y terciarias forman los flancos de la principal estructura del área, el sinclinal de Usme, cuyo eje se desplaza de sur a norte aproximadamente paralelo al río Tunjuelo. En la cuenca sinclinal se encuentran cuerpos cuaternarios coluviales y fluvioglaciales aportados por el río Tunjuelo y sus afluentes. Se presentan rasgos tectónicos (fallas y pliegues, INGEOMINAS 1988), que influyen en la morfología del terreno y afectan parcialmente la estabilidad de los taludes.



**Fig. 2b. Fotocalco con la interpretación geológico - geomorfológica de la fotografía aérea anterior, donde se ubicó el relleno sanitario y el flujo de basuras del 27 de septiembre de 1997, a lo largo del cauce de la quebrada Puente Blanco.**

Dentro del área se encuentran rocas sedimentarias que corresponden al Grupo Guadalupe (Cretácico) y a las formaciones: Guaduas, Cacho, Bogotá, Arenisca de La Regadera y Usme (Terciario). La Arenisca de La Regadera representa el mayor rasgo morfológico y topográfico del sector, conformando la serranía de Doña Juana (JULIVERT 1961a, ACOSTA & BELTRÁN 1987, CUERVO & RAMÍREZ 1985, PÉREZ & SALAZAR 1971, VAN DER HAMMEN 1995). Las formaciones Tilatá y Sabana representan la parte superior del relleno lacustre

de la Sabana de Bogotá (HUBACH 1957), distribuido en la planicie de la Sabana a manera de terrazas. Dentro de los depósitos cuaternarios se diferencian depósitos fluvioglaciales, conos de deyección, abanicos aluviales, coluviones y material de relleno.

## GEOMORFOLOGÍA

Se diferencian unidades de rocas competentes y

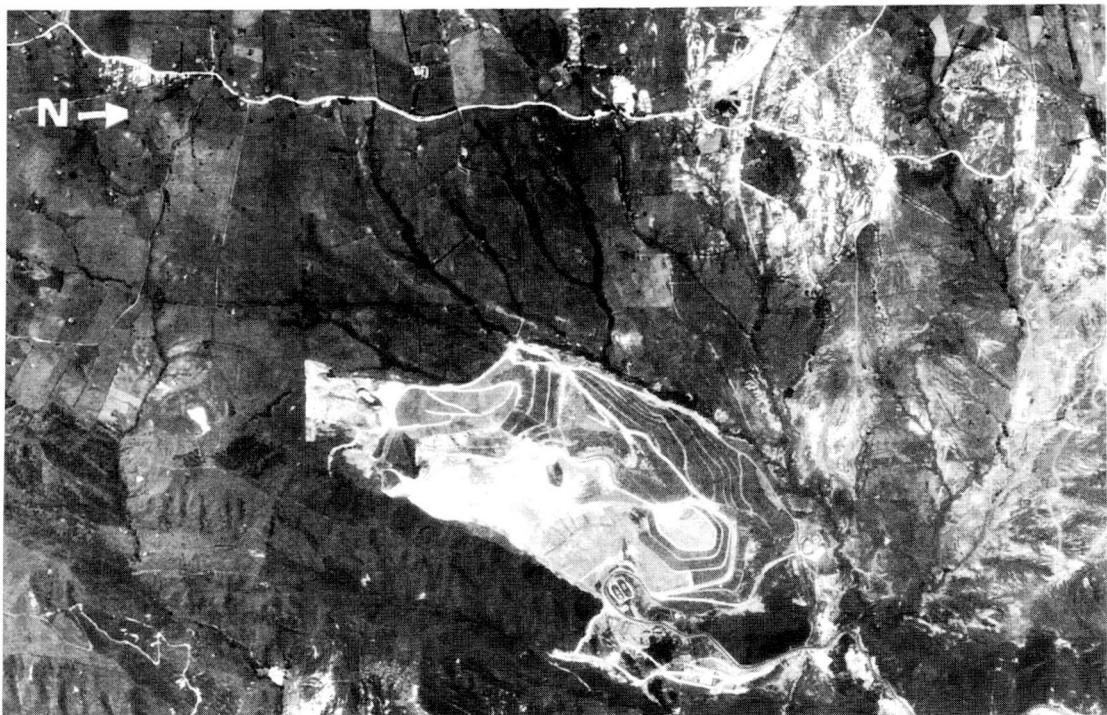


Fig. 3. Fotografía aérea 140 del vuelo C-2546 de 1994, a escala 1:40.000 donde se aprecia en la parte central, el área cubierta con el relleno sanitario antes del flujo del 27 de septiembre de 1997. Se aprecia la red de drenaje paralela a sub-paralela en la parte superior, cuyos cauces se encuentran intensamente erosionados con cárcavas, algunas utilizadas ya como relleno sanitario y los conos de deyección en la parte inferior de la fotografía.

depósitos no consolidados, y las geoformas de la planicie donde se pueden presentar inundaciones por aumentos del caudal en el valle del río Tunjuelo. Los principales cambios corresponden a incremento de la inestabilidad, por la presencia del relleno sanitario donde se generó el flujo, la intensificación en los procesos de socavación y carbocavamiento por el mal manejo de aguas residuales provenientes de las viviendas del sector de Mochuelo Bajo y por último a la extracción descontrolada de materiales para construcción.

El abanico aluvial del Tunjuelo está descrito y definido como un cono de varios lóbulos que descendieron de la vertiente del Páramo de Sumapaz y se fusionaron para formar el fondo aluvial del río (Figs. 2a y 2b). Los conos de deyección están compuestos de fragmentos subredondeados a angulosos de rocas sedimentarias en una matriz limo-arcillosa mal seleccionada y generalmente con incipiente desarrollo de suelo, tienen alta permeabilidad y pueden alcanzar espesores de más de 30 m. Se aprecian claramente en el valle aluvial del río, en las desembocaduras de las quebradas Mochuelo, Yerbabuena y Puente Blanco, a lo largo de la cual se desplazó el flujo de basura (Figs. 2b y 3, Fotografías D, E, F, G y H).

La presencia de grandes coluviones en las laderas y de conos de deyección de origen torrencial, a la salida de las gargantas, formadas por las corrientes por disección de la Formación Arenisca de La Regadera (Figs. 2a y 2b), evidencia la inestabilidad del terreno donde actualmente se ubica el relleno, el cual presenta gaviones de contención para estabilizar la carretera de acceso (Fotografías, E, F, y G).

Se diferenciaron dos unidades morfológicas del paisaje a partir de las características morfodinámicas: montañosa colinada y semi-plana o plana. La primera corresponde a unidades de tipo estructural plegadas, donde la morfogénesis predominante es denudativa y estructural; y la segunda es de tipo agradacional o acumulativa a partir del material arrastrado por corrientes, gravedad y procesos erosivos, asociados a procesos de acumulación de pie de monte (VILLOTA 1991).

La unidad montañosa estructural plegada denudacional, corresponde a las partes con topografías abruptas tanto en la zona oriental como la occidental, conformando los flancos de la estructura sinclinal de Usme. Está caracterizada por alturas de hasta 3.400 m.s.n.m., formando los cerros orientales y occidentales controlados por estructuras



Fig. 4. Fotomosaico del área del relleno sanitario de Doña Juana, donde se aprecia el flujo de basuras del 27 de septiembre de 1997. Se observa el comportamiento rotacional - traslacional desde la corona del deslizamiento; ①; las direcciones del flujo ②; el control litológico de la Formación Areniscas de La Regadera ③; los lóbulos finales de acumulación de la basura ④, uno de los cuales tapó el cauce del río Tunjuelo ⑤, formando represamiento de las aguas y otro se desplazó en dirección aguas abajo a lo largo del cauce ⑥; Escala aproximada 1:24000.

geológicas, que afectan las rocas sedimentarias cretácico-terciarias allí aflorantes (Fig. 2a y 2b).

Las unidades agradacionales corresponden a las zonas semi-planas y a los taludes que están circundando el sector montañoso hacia el valle mismo del río. Están constituidas por el relleno cuaternario conformado por unidades de paisaje de tipo agradacional, generadas por procesos morfodinámicos de sedimentación y/o acumulación bajo condiciones fluviales, fluvioglaciales y coluviales. Estas unidades corresponden a los depósitos de conos, terrazas, depósitos aluviales y rellenos (Fig. 2a y 2b).

## GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El área al sur de Bogotá está dividida en tres grandes bloques: *El Oriental Levantado* (Anticlinal de Bogotá y cerros surorientales) separado del flanco oriental del sinclinal de Usme por la falla de Bogotá. *El Central Hundido* (Sinclinal de Usme) limitado al oriente por la falla de Bogotá y al occidente por la falla de Tunjuelo-Mochuelo y *El Occidental Levantado* (Anticlinal de Cheba-Quiba), limitado al oriente por la falla de Tunjuelo-Mochuelo y al occidente por el valle del río Soacha (INGEOMINAS 1988).

**Sinclinal de Usme:** Se conoce también como el sinclinal de Usme-Tunjuelo a la estructura plegada y erosionada en el núcleo, donde se encuentra el valle aluvial del río Tunjuelo y sus afluentes, cuenca hidrográfica más importante del suroriente de la Sabana de Bogotá. Es un pliegue con rumbo preferencial N-NE a S-SW, amplio y asimétrico que presenta cierre al sur en la región del Sumapaz y hacia el norte se hunde bajo los sedimentos cuaternarios de la Sabana. Trabajos previos sectorizan los dos flancos de la estructura con base en la disposición de los estratos de las unidades aflorantes en el sentido de capas normales o invertidas y en la presencia de fallas (JULIVERT 1961a, GUTIÉRREZ & COLEGIAL 1987, INGEOMINAS 1988).

En el Cerro Doña Juana, la Formación Arenisca de La Regadera en su flanco occidental llega a tener buzamientos de 60° grados al W en posición estructural invertida, al norte del valle de la quebrada Mochuelo. Al sur, en los cerros Campanario y El Moral, la formación se encuentra en posición normal, con buzamientos de 50° a 70° al este.

## LOS RELLENOS SANITARIOS

El relleno sanitario es una técnica considerada como nueva en el país y los estudios realizados no incluyen análisis de amenazas ni la caracterización de los fenómenos que se pueden presentar, tales como la producción de gases y lixiviados, deslizamientos y los impactos ambientales

adversos que generan. El relleno sanitario implica en su definición normas, controles, guías de diseño, operación, disposición, administración y manejo de basuras. Numerosos han sido los trabajos técnicos básicos que recopilan el manejo de rellenos sanitarios a partir de la experiencia adquirida anteriormente durante evaluaciones y estudios del manejo de basuras (ZALTZMAN 1975; HERRERA & VILLAMIL 1992, HERMELIN 1990a, 1990b, 1993, TABARES & OROZCO 1992; COHEMIS 1997).

El relleno sanitario, definido por la American Society of Civil Engineers, en ROLANDO & ROJAS (1991), es un método para la disposición de basuras en el suelo sin detrimento del medio ambiente, sin causar molestias ni peligros para la salud y seguridad pública, utilizando principios de ingeniería para confinar las basuras en un área lo más pequeña posible, a la vez que reducirlas al menor volumen que sea practicable y cubrir las basuras así depositadas, con una capa de tierra y suelo lo más frecuentemente como sea necesario. Este método es el más generalizado y útil para recuperación de terrenos si se administra debidamente en cuanto al asentamiento y cubrimiento y puede ser inofensivo ya que evita la contaminación y el impacto ambiental.

Deberá considerarse el terreno, tipo de suelo, drenajes, dirección de los vientos, vías de acceso y distancias a los núcleos poblacionales. Pueden usarse tres métodos de relleno: el de trinchera, el de rampa y el de terreno a nivel (HERRERA & VILLAMIL 1992).

En el método de rampa, el depósito de basuras deberá tener pendientes de 30°, compactarse mecánicamente y cubrirse diariamente con 15 cm de material de relleno. Es el más aconsejado para terrenos con declives moderados y es el empleado en Doña Juana. Las ventajas de este tipo de relleno, cuando es el adecuado, es que no necesita selección de desperdicios, disminuye los olores, peligro de incendio, roedores etc., siempre y cuando su manejo cumpla con los manuales de operación. El principal inconveniente es que si no se maneja adecuadamente, no se recolectan y no se extraen los gases y lixiviados que se instalan en el cuerpo del relleno, se podrá convertir en un vertedero o flujo como ocurrió en Doña Juana. Generalmente se deben escoger terrenos bajos (HERRERA & VILLAMIL 1992), que puedan llenarse hasta alcanzar el nivel topográfico. Esta condición no se cumple ni es la adecuada en el relleno de Doña Juana.

## CARACTERISTICAS DEL RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA

### Antecedentes

El manejo de residuos sólidos en un relleno sanitario, como está concebido, es una técnica realmente nueva en la ciudad y sobre la cual el análisis de peligrosidad y manejo de amenazas no ha sido tenido en cuenta y la información existente es realmente nula. Anteriormente a la puesta en marcha del relleno, sólo se acumulaban las basuras en zonas no adecuadas, como en la llanura aluvial del río Bogotá y en los rellenos de Gibraltar y El Cortijo.

No se ha evaluado, hasta después del flujo, el impacto ambiental adverso que provocaría el deslizamiento de estas masas de desechos y no se encuentra registro o monitoreo alguno en la literatura especializada consultada concerniente al relleno. Numerosos fueron los estudios previos relacionados con el relleno; entre los principales podemos destacar los de INGESAM (1986a, 1986b), que realizó las evaluaciones, estudios y diseños del relleno sanitario de Doña Juana, que comprendieron desde la selección del sitio hasta el manual de operaciones del relleno; no consideró detalladamente la inestabilidad de las obras del relleno. AGUAS SUBTERRÁNEAS LTDA (1993) presentó los estudios básicos para adecuar la zona donde se presentó el flujo rotacional-traslacional, los cuales contemplaron una evaluación geofísica y geológica. La evaluación del subsuelo comprendió la definición de las condiciones estratigráficas, hidrogeológicas y geoeléctricas para determinar niveles freáticos. No contemplaron análisis de amenaza por inestabilidad del apilamiento de basuras, ni definieron morfológicamente la presencia de los conos de deyección de origen torrencial en las cuencas de las quebradas Puente Blanco y Yerbabuena – Mochuelo.

CELIS & ISAZA (1982), presentan la posibilidad de aprovechar el poder calorífico del relleno para generación de energía a través de una central térmica. ROLANDO & ROJAS (1991), realizaron un estudio acerca de la caracterización de los biogases (mezcla producida durante la degradación anaeróbica de la materia orgánica, compuesta por metano y dióxido de carbono) del relleno, considerando los diferentes materiales dispuestos y la producción y migración tanto lateral como vertical dentro de éste.

USECHE (1991) realizó una evaluación nacional para formular una verdadera política ambiental en el manejo de residuos sólidos, y concluye que en la ciudad capital se acumulan los desechos indiscriminadamente con todo tipo de contaminantes, generando la degradación de los suelos. Los desechos, históricamente, siempre han tenido como disposición final los suelos y cuerpos de agua y su forma de ubicación ha sido limitada a regar la basura en zonas bajas, sin el debido recubrimiento y compactación necesarios para un adecuado acondicionamiento del terreno, por lo tanto no son rellenos sanitarios propiamente dichos. Son desechos

esparcidos, operación que se repite hasta obtener la cota de nivelación, como en el caso de los basureros de Gibraltar y El Cortijo.

En el relleno de Doña Juana la contaminación del río Tunjuelo por los lixiviados sin tratamiento adecuado, es un ejemplo típico de la problemática ambiental generada por el mal manejo de los rellenos. En 1995 al nivel nacional, la disposición final de las basuras se distribuía así: 15% en cuerpos de agua; 32% en rellenos sanitarios; 3% enterrados y 50% en campos abiertos.

### **Características generales del relleno**

El relleno de Doña Juana fue inaugurado el 1º de noviembre de 1988 y desde esa época está recibiendo la totalidad de los desechos de la ciudad y de municipios vecinos. El relleno se divide en dos áreas: la denominada zona 1, que es la zona antigua y que recibió basura hasta aproximadamente el año 1994, donde también se presentaron algunos procesos de inestabilidad, manifiestos en campo por la presencia de gaviones de contención hacia el valle de la Quebrada Yerbabuena; y la denominada zona 2, que recibe la basura desde 1995 hasta hoy y desde el momento del deslizamiento que generó la emergencia, como se aprecia en la Fig. 3.

Los estudios de INGESAM (1986a, 1986b) muestran que el área fue escogida por los siguientes aspectos, sin tener en cuenta algunos otros como la estabilidad:

- Su gran extensión y por ende una apreciable capacidad para recibir desechos sólidos.
- Cercanía a la nueva autopista al Llano, lo que facilita el transito de vehículos.
- Densidad poblacional baja para la época (1986).
- Zona de baja actividad agrícola.
- La pendiente ( $6^{\circ}$  pero con una alta diferencia topográfica).
- Zona con gran espesor de arcillas que presume una buena impermeabilidad y bajos costos de manejo.
- Volumen considerable de material de suelo para cobertura.
- Factibilidad de recibir residuos peligrosos.
- Poca factibilidad de inundación del relleno.
- Ubicada en la zona de influencia de Ciudad Bolívar.

El relleno fue planificado desde 1983, año en que se iniciaron los estudios y diseños. El relleno sanitario utiliza sólo el 38% del área previamente asignada. En los nuevos taludes que se han construido con el apilamiento de basuras, se ha presentado inestabilidad, los filtros de drenaje para lixiviados se taponaron y el frente de trabajo es excesivo en tamaño. El producto de los lixiviados sin adecuado tratamiento es descargado por la quebrada Yerbabuena al río Tunjuelo, con alta concentración de elementos sólidos

portadores de sustancias tóxicas como cromo y mercurio, metano, sulfuro de hidrógeno y amoníaco.

Aproximadamente desde julio de 1997 se estableció en el relleno el tratamiento de lixiviados por "recirculación", método utilizado en otros países y propuesto en el estudio de impacto ambiental (INGESAM 1986a) y utilizado por primera vez en Colombia, el cual consiste en captar los lixiviados y reinyectarlos a la basura para que ésta actúe como un filtro, para que al captarlos nuevamente mejoren sus características fisicoquímicas, hasta el punto que puedan salir similares en calidad al agua del río Tunjuelo y así ser vertidos directamente a él.

#### **Tipos de residuos dispuestos en el relleno sanitario**

De acuerdo al manual de operaciones y mantenimiento del relleno sanitario (INGESAM 1986b), las características de los residuos a disponer en el relleno comprendían residuos domésticos e industriales no peligrosos. Contempla el manual la existencia de una zona especial para la disposición de desechos peligrosos y que no estaba en funcionamiento. En la actualidad la disposición de los desechos se hace sin ningún tipo de discriminación, haciendo caso omiso de la reglamentación establecida para la disposición de residuos peligrosos y muy peligrosos en el relleno. Esto ha sido comprobado en el flujo, al encontrarse mezclados con los residuos domésticos e industriales, los residuos de carácter peligroso y contaminantes.

#### **Conformación del Relleno**

La disposición diaria de los residuos se realiza en celdas construidas con el residuo sólido descargado continuamente en el frente de trabajo. Los residuos sólidos son esparcidos en capas y compactados por un tractor en repetidas pasadas. Una celda está conformada por el residuo depositado en un día y por el material de cobertura correspondiente, alcanzando dimensiones cuyo ancho depende del frente de trabajo, con base en cinco metros de frente por vehículo y un tiempo de descarga de cinco minutos, para obtener alturas de cuatro metros con 0.10 m de material de cobertura; y la longitud depende del volumen de material depositado (Fig. 4). Las celdas se cubren diariamente y la más superior o final, de acuerdo al diseño, se cubre con 0.60 m de material en dos capas de 0.30 m. Transcurridos 30 días, la primera capa compactada se nivela con nuevo material debido a la presencia de hundimientos y grietas, y finalmente se adicionan 0.30 cm de material de relleno con tierra negra sembrando pastos para control de erosión y adecuación para futuro uso recreativo. El material de cobertura corresponde al previo descapote de material del mismo sitio, colocado en cotas superiores para luego cubrir cada celda.

#### **Gases y Lixiviados**

En los rellenos sanitarios se generan gases y lixiviados, como consecuencia de la biodegradación física y química de los residuos por la acción de las bacterias presentes y por la interacción con los productos intermedios de su descomposición. Dependiendo de los materiales, el proceso de descomposición procederá de manera rápida, moderada o lenta, ya que se presenta heterogeneidad en cuanto a las fases de estabilización de los residuos en cada celda, la formación del lixiviado y la presencia de dióxido de carbono y metano.

El biogas que se genera es básicamente una mezcla de metano, dióxido de carbono, agua, nitritos y nitratos, hidrógeno, nitrógeno y trazas de componentes orgánicos. Para los gases existen sistemas de recolección con salidas verticales por chimeneas desde su interior. Estas se extienden desde la base, arcillolitas de la Formación Bogotá, hasta la superficie final. Se han reportado temperaturas entre 12° y 36° C al nivel de las chimeneas de extracción de gases ubicadas en superficie indicando que en las celdas inferiores la temperatura puede ser mayor.

En cuanto a los lixiviados (líquidos que se producen por la degradación de la materia orgánica y con abundantes metales), para el relleno de Doña Juana se han construido sistemas de recolección de estos mediante tubería de drenaje en los diferentes niveles o pilas de basura, que para la fecha del flujo se vertían directamente al cauce del río Tunjuelo, a pesar de estar contemplada una planta de tratamiento de lixiviados desde que se diseñó el relleno.

#### **DINAMICA DEL FLUJO DE BASURAS DE DOÑA JUANA DEL 27 DE SEPTIEMBRE DE 1997**

#### **Generalidades**

Desde el punto de vista geomorfológico los deslizamientos constituyen procesos naturales de degradación; desde el punto de vista geomecánico, constituyen desplazamientos del terreno o masas de material provocados por la gravedad cuando por alguna razón natural o artificial, se producen esfuerzos de corte que superan la resistencia debida a la cohesión y al ángulo de fricción interna de los materiales.

BATES & JACKSON (1987 pg. 368), emplea el término "landslide" para describir una amplia gama de movimientos en masa y sus procesos generadores que involucran transporte pendiente abajo ayudado por la gravedad, y que involucran grandes masas de materiales como rocas y suelo que se desplazan a lo largo de una superficie de corte. Igualmente,

BATES & JACKSON (1987 pg. 249), define un flujo como un movimiento en masa de materiales inconsolidados que presenta un comportamiento plástico, semifluido o viscoso, donde la presencia de fluidos es usualmente requerida. Es una masa de material movida por un flujo.

Un deslizamiento rotacional es un movimiento en masa donde se presentan cizalladuras o cortes a lo largo de una o varias superficies de falla curvas y cóncavas hacia arriba, dentro de una zona relativamente estrecha, que es visible o inferida, produciendo una rotación hacia atrás en la masa desplazada pendiente abajo, debido a fuerzas que causan un movimiento alrededor de un punto localizado encima del centro de gravedad del material desplazado. Este tipo de deslizamiento puede ser simple, sucesivo o múltiple (Hutchinson 1968, en BATES & JACKSON 1987, pg. 577).

Un deslizamiento traslacional es un movimiento en masa que implica un desplazamiento pendiente abajo a lo largo de superficies de falla mas o menos planas o suavemente onduladas y paralelas a la superficie, en contraste con los movimientos rotacionales (BATES & JACKSON 1987, pg. 696).

### **Características del flujo**

Si bien no son frecuentes los flujos en rellenos sanitarios, se emplea en el presente trabajo el término "Flujo de Basuras rotacional a traslacional" debido a que fue un movimiento complejo de una gran masa de basuras inconsolidadas que se desplazaron pendiente abajo ayudadas por el alto contenido de fluidos dentro de ella y que se cizalló a lo largo de fallas curvas rotacionales en la cabecera del deslizamiento y se deslizó sobre el geotextil encima de las arcillas de la Formación Bogotá. En la parte media y baja del deslizamiento éste fluyó de manera traslacional sobre basuras y sobre las rocas de la Formación Arenisca de La Regadera y conos de deyección a lo largo del cauce.

En el relleno sanitario de Doña Juana se presentó el flujo a lo largo del cauce de la quebrada Puente Blanco, un cauce menor ubicado 500 m al sur del cauce principal de las quebradas Yerbabuena y Mochuelo, que captan aguas de escorrentía y los lixiviados producidos por el relleno. El flujo de basuras generó problemas de carácter ambiental por olores, presencia de roedores, lixiviados, contaminación de acuíferos y por el taponamiento del cauce original del río Tunjuelo, produciendo un represamiento de sus aguas y las de la Quebrada Yomasa, colector proveniente de la vertiente suroriental de la ciudad (Figs. 4, 5 y 6).

En el momento del desastre se interrumpió el recibo de basuras porque la zona de trabajo se derrumbó y la carretera de acceso quedó taponada, como se aprecia en los

estereogramas de las Figs. 5 y 6. A las diez de la noche del mismo 27 de septiembre, la empresa Prosantana, administradora del relleno, dio al servicio la zona 4 o zona de emergencia, localizada muy cerca al cauce del río Tunjuelo, es decir en sus riberas, área igualmente no muy apta para tal fin. En el momento de la emergencia por el represamiento del río, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B.) cerró las válvulas de la represa de La Regadera y en pocos días se inicio la construcción de un canal provisional para desviar las aguas represadas del río, incluidas las de la quebrada Yomasa, que funciona como el mayor colector de aguas negras del sector suroriental de la ciudad.

### **Dinámica del deslizamiento**

Posterior a la puesta en marcha del proceso de recirculación de los lixiviados, se empezaron a presentar en el mes de septiembre algunas fisuras en la zona donde se estaban depositando las basuras, hasta que el día 27, en horas de la mañana, se observó que las fisuras iban aumentando y los primeros indicios de un flujo de una gran masa de basura eran inminentes (LITTLE 1998). Hacia las cuatro de la tarde se produjo un deslizamiento de aproximadamente 800.000 metros cúbicos de basura entre residuos sólidos, plásticos, orgánicos y hospitalarios hacia el río Tunjuelo (Figs. 5 y 6; Fotografías A, B y C). El flujo de basuras con alto contenido de lixiviados se desplazó una distancia de 1.500 m, con un ancho entre 100 y 300 m a lo largo de la cuenca de la quebrada Puente Blanco, llegando hasta el cauce del río Tunjuelo para taponarlo en un tramo de aproximadamente 400 metros de largo y amenazando con su desbordamiento (Figs. 5 y 6).

Según las evaluaciones realizadas se ha determinado que el subsuelo arcilloso de la Formación Bogotá no falló; fue un deslizamiento que comenzó de manera rotacional a traslacional, de basuras sobre basuras por la falta de homogeneización de los materiales de desecho, los cuales no eran sometidos a trituración para que no hubiera distinción entre los elementos constitutivos de las basuras. Los líquidos lixiviados no permearon por la basura de manera uniforme y se ordenaron en cambio en "bolsas lentes", como pequeñas "lagunas" ubicadas a diferentes profundidades del flujo de desperdicios (MORENO 1998).

La acción de la gravedad junto con la intensa humedad, la pendiente alta y el efecto lubricante del geotextil ubicado sobre la superficie arcillosa de la Formación Bogotá y que sirvió de superficie de despegue (MOJICA *et al.* 1998), facilitó el comportamiento rotacional y traslacional del flujo de basuras.



Fig. 5. Estereograma mostrando la parte alta del flujo rotacional translacional en el relleno sanitario de Doña Juana, donde se observa estereoscópicamente: Las grietas superiores, la corona del flujo generada en la superficie del relleno ①, que dio origen al escarpe principal, la cabeza del flujo que genera bloques rotados independientes limitados por las fallas de cizalla curvas. Se aprecian también escarpes menores en los flancos y la dirección del flujo ②, zonas de cizalla sucesivas entre las basura deslizada sobre las rocas de la Formación Bogotá y controladas por el escarpe de la Formación Areniscas de La Regadera ③ . Escala aproximada 1:24000.

## Descripción del movimiento

A partir del fotomosaico general de la Fig. 4, de los estereogramas detallados de las Figs. 5, 6, 7 y 8 se interpretó la dinámica del flujo de basuras del relleno sanitario de Doña Juana.

El deslizamiento comienza con un movimiento de tipo rotacional en la cabeza del flujo, evidenciado por grietas y fracturas superficiales (Figs. 5, 6, 7 y 8), ocasionado por las presiones generadas por los biogases y lixiviados atrapados entre las celdas de basura formadas a manera de bolsas-lentes de líquidos (Fotografías A, B y C). El flujo obedece a un movimiento de masas apoyado sobre superficies de falla cóncavas bien definidas, en este caso entre el suelo arcilloso con geotextil y la masa de basuras de hasta 20 m de altura, claramente separada del terreno base, que no se mueve. El flujo continúa como de tipo translacional a lo largo de una superficie de falla más o menos plana a ligeramente ondulada. El deslizamiento presenta elementos bien definidos, como son cabeza, flancos, escarpes y pie (Figs. 4, 5, 6, 7 y 8; Fotografías D, E, F, G y H).

La parte final del flujo continuó de tipo viscoso por la alta concentración de lixiviados dentro de la masa de basuras que brotaron por las superficies de falla y entre la masa de basura a medida que se desplazaba pendiente abajo, afectando la parte superior más suelta o inconsolidada del relleno donde los materiales estaban húmedos, desplazándolos rápidamente debido al exceso de lixiviados (Fotografías D y E). El flujo hacia el río Tunjuelo, solo afectó el material de basuras y suelos mezclados, en un espesor de 30 m. aproximadamente, desde la superficie del relleno y sobre los materiales arcillosos de la Formación Bogotá. En la parte final del flujo viscoso, se acumularon varios eventos sobrepuertos dando origen a una morfología de lóbulos que se distribuían sobre la superficie del valle aluvial taponando el cauce del río.

## Análisis fotointerpretativo

La interpretación de las fotografías aéreas tomadas después de ocurrido el evento, permite observar la dinámica del flujo (Figs. 4, 5, 6, 7 y 8):

- El deslizamiento comienza con grietas sobre la superficie del relleno, en la superficie original del terreno formado por arcillas de la Formación Bogotá, aproximadamente a 20 metros de profundidad, la cual estaba cubierta con geotextil. Este proceso genera la formación de una corona ①, como se observa en las Figs. 4 y 5 y en las Fotografías A, B y C.

- A partir de la superficie del relleno, se genera un escarpe principal y una cabeza del deslizamiento que se comienza a dividir en cuerpos individuales traslacionales o flujos dirigidos según la pendiente ②, observándose la generación de escarpes menores en los flancos laterales izquierdo y derecho de las paredes del deslizamiento de basuras, grietas en la basura deslizada entre rocas competentes de la Formación Arenisca de La Regadera ③ en la margen derecha (Fotografías A, B y C), y el flujo de basuras en la margen izquierda, la superficie de deslizamiento y el pie o extremo del flujo ④, conformado por los diferentes lóbulos finales a manera de dedos, generados por los flujos viscosos ⑤ y ⑥ (Fotografías D, E y F).
  - En el perfil A-B-C de la Fig. 8, realizado a lo largo del deslizamiento visto en las Figs. 4, 5, y 6, se aprecia que el flujo rotacional - traslacional se inició al generarse las grietas transversales a profundidades que alcanzaron los 5 y 15 metros de profundidad dentro del relleno y que facilitaron el desplazamiento pendiente abajo de la masa superior. Esta produjo una sobrecarga, que ayudada con la gran cantidad de lixiviados que contenían las basuras por la reinyección y el drenaje deficiente, permitieron que el flujo viscoso secundario, se desplazara pendiente abajo de manera translacional, hasta que éste venció la barrera natural formada por las rocas de la Formación Arenisca de La Regadera ③.
  - A partir de este punto, la masa de basura salta el obstáculo natural formado por la Arenisca de La Regadera (Fotografías E, F, G y H); parte del flujo se desplaza sobre los predios del campamento de la empresa Prosantana, operadora del relleno, destruyendo la cerca límite de los predios y arrastrando parte de la maquinaria empleada en el proceso de mantenimiento.
  - El cuerpo principal del flujo translacional continúa fluyendo a lo largo del cauce de la quebrada Puente Blanco con una pendiente muy fuerte de 20% que facilitó el avance sobre la llanura aluvial del río Tunjuelo y sobre los depósitos del cono de deyección o abanico aluvial antiguo, como un flujo viscoso evidenciado por los canales dejados y expresados como direcciones de flujo ④, para formar lóbulos superpuestos en el extremo o pie del deslizamiento.
- La parte final de flujo o pie se ramificó en lóbulos con tres direcciones principales, los cuales se desplazaron así:
- El más grande se dirigió hacia el oriente, ubicándose sobre la superficie destinada a seleccionar material de la explotación que se realizaba en el abanico y rellenan-



Fig. 6. Estereograma mostrando la parte baja del deslizamiento rotacional traslacional en el relleno sanitario de Doña Juana, donde se observa estereoscópicamente: La garganta (G) formada en las rocas de la Formación Arenisca de La Regadera (Tar) por la disección de la quebrada Puente Blanco, por donde se desplazó el flujo. La porción del flujo que invadió el campamento de la Empresa Operadora (Eo), y pendiente abajo, el segundo estrechamiento entre las rocas terciarias y el cono de desyección (Cd). El Flujo formó 3 lóbulos de acumulación en el pie, uno hacia el sur que reprendió el río Túñuelo y la quebrada Yomasa <sup>(5)</sup>, y el otro hacia el oriente <sup>(6)</sup>, uno hacia el norte a lo largo del cauce del río <sup>(6)</sup>. Fotografías a escala 1:24000 aproximadamente.

do las canteras en explotación sobre la margen izquierda del río (Fotografías D, E, y H).

- El brazo norte se desplazó en dirección aguas abajo a lo largo del cauce del río Tunjuelo, taponándolo en alturas que alcanzaron los 30 metros ⑤,
- y el tercero se desplazó hacia el sur ⑥, también a lo largo del cauce del río en dirección aguas arriba, generándose el represamiento del río Tunjuelo y de la Quebrada Yomasa (Figs. 5, 6, 7 y 8; Lámina I: Fotografías D, E, F y H).

## ANALISIS DEL FLUJO

El flujo de basuras era un fenómeno predecible, ya que el terreno empleado para la disposición de las basuras presenta una considerable amenaza por movimientos en masa torrenciales y condiciones morfológicas poco favorables. Así mismo, dicho flujo ha generado un gran impacto ambiental en los recursos hídricos, el suelo, el aire, el paisaje y la salud pública. La evaluación de gases contaminantes, amoniaco y sulfuro de hidrógeno (LUPIEN ROSENBERG ET ASSOCIES 1997), solo tuvo sus máximos valores, en especial para amoniaco el día 9 de octubre de 1997, aparentemente por la remoción de basuras y siempre se ha mantenido por debajo de los máximos permitidos.

En cuanto a los lixiviados, en noviembre de 1997 se inicio un programa de aforo y caracterización de las aguas del río Tunjuelo antes y después de la zona donde se acumulo el flujo en el lecho del río. Los resultados muestran que aguas abajo de la zona de acumulación, las aguas del río presentaban valores más altos que los permitidos para fenoles, hierro, manganeso, sulfuros y mercurio. Se presume que estas sustancias son originadas por la percolación de los lixiviados. En la quebrada Yerbabuena, al norte de la zona de acumulación del flujo, los valores fueron más altos que en el río, ya que ésta quebrada sirve de vía natural de drenaje de los lixiviados y además mostró altos valores de contaminación bacteriológica.

La evaluación de estabilidad determina que, en esta cuenca, la posibilidad de que se presenten nuevos procesos naturales de remoción en masa es alta, más aún con la presencia del relleno, los que afectarían el cauce del río Tunjuelo por posibles represamientos.

La presencia de materiales de origen torrencial representados por los conos de deyección en ambas márgenes del río Tunjuelo, permite deducir que en algún tiempo, tanto por el cauce de la quebrada Puente Blanco por donde fluyó la basura, como por el cauce de la quebrada Yerbabuena-Mochuelo, los conos represaron y taponaron el río hasta que su mismo flujo tuvo que labrar el cauce actual.

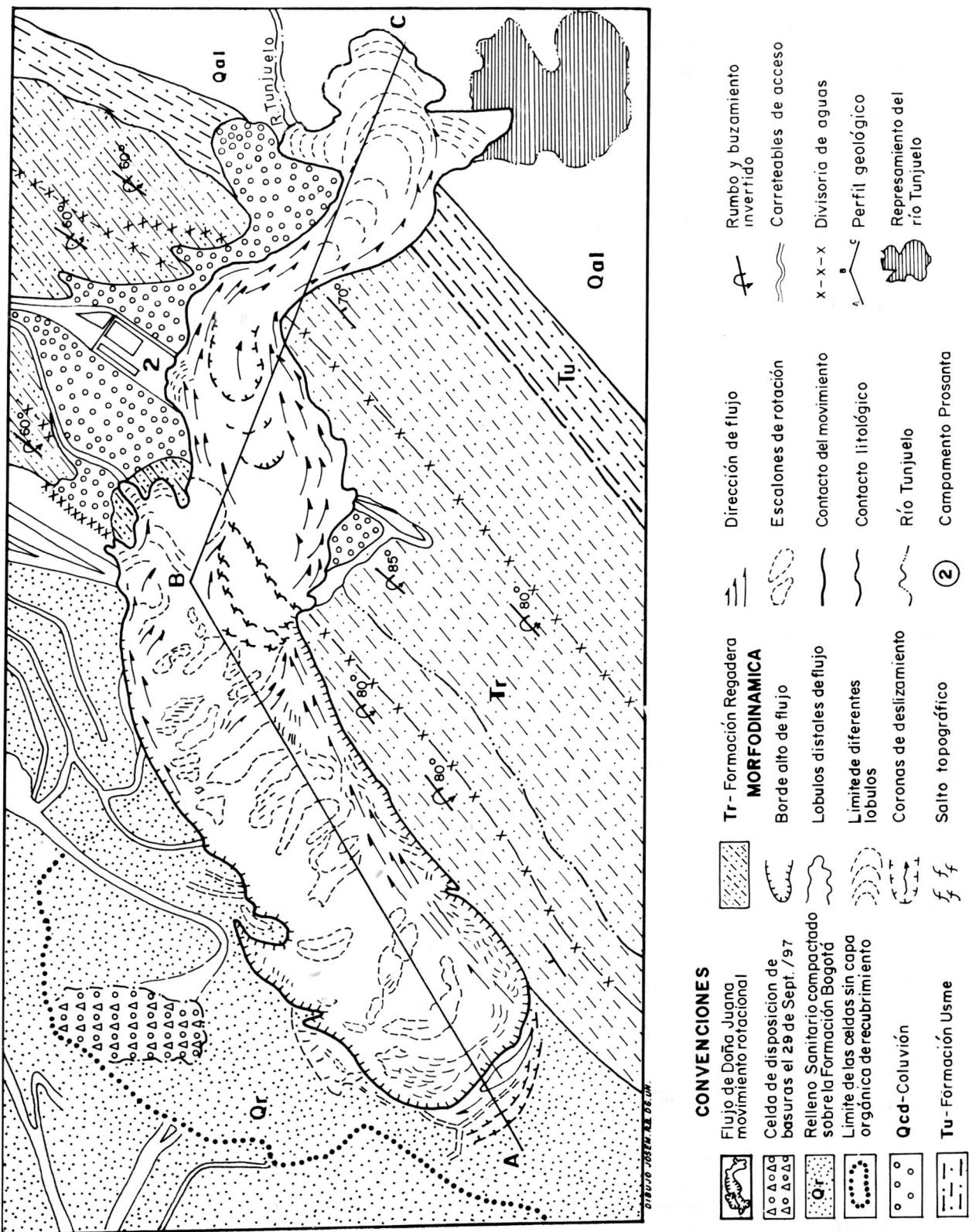
La superficie arcillosa sobre la Formación Bogotá donde se depositaba la basura y que está recubierta con material geotextil, actuó como deslizante, pero el material rocoso no falló. La sobrecarga de basuras, la lubricación de los líquidos residuales allí almacenados que no estaban siendo drenados adecuadamente, la falta de selección y compactación de los materiales apilados, las presiones generadas por los gases acumulados que tampoco eran bien evacuados, fueron los detonantes que pusieron en marcha esta amenaza previamente definida y que terminó de dar forma al flujo y a la posterior emergencia y que representaba un alto riesgo ambiental.

La presencia de grietas en la parte superior del deslizamiento, en los días anteriores a éste y justo horas antes del evento, permite asumir que el origen de estas grietas y fisuras que originaron las superficies deslizantes del movimiento (Figs. 4, 5 y 7), se generaron por la presencia de altas concentraciones de biogases dentro de las celdas que no podían ser evacuados por las chimeneas construidas para tal efecto; además no se conoce la cantidad de gas producido y si las chimeneas eran eficientes para evacuarlos. Las fotografías A, B y C, muestran que en la zona donde se presentó el deslizamiento no estaban instaladas las chimeneas de extracción de gases, la cubierta del relleno no parecía ser la adecuada en cuanto al espesor y no se había realizado el sembrado de pastos.

## Análisis multitemporal

Se realizó un análisis fotointerpretativo histórico del área del relleno, con el fin de evaluar la situación de la cuenca antes y después de presentarse el flujo, desde el punto de vista de red de drenaje, litología, morfología, erosión, estabilidad, evolución del relleno y zonas inundables. Para ello, se analizaron las fotografías del año 1961 (Vuelos M-1142 y C 1367); de 1981 (Vuelo C-1985); el vuelo C-1362 de 1993 (vuelo C 2520), y del año 1994 (Vuelo C-2546), último registro fotográfico hasta la fecha del flujo, los cuales cubren el área a diferentes escalas.

Las fotografías de 1961 (C-1367, fotos 034 y 035 y M-1142, fotos 906 y 905), muestran la cuenca de El Mochuelo con los abanicos aluviales provenientes de las cuencas de las quebradas Puente Blanco, Yerbabuena y Mochuelo. Se aprecia el patrón de drenaje paralelo a sub-paralelo y el intenso carcavamiento y procesos erosivos en la parte norte de la cuenca. Estos rasgos morfológicos claramente identificables indican que sus taludes presentan una amenaza por eventos torrenciales y movimientos en masa en las laderas, y que cualquier actividad realizada, ameritaba tener un adecuado estudio de obras de contención y adecuación.



**Fig. 7.** Fotointerpretación del flujo en el relleno sanitario de Doña Juana, tomado a partir de las fotografías de la Fig. 3. Se observan las diferentes partes del flujo, las unidades de roca que limitan el área del relleno y los principales rasgos estructurales. Escala 1:24,000, aproximadamente.

Las fotografías de 1981 (C-1985, fotos 109-110), muestran el patrón de drenaje paralelo de la cuenca, la disposición estructural de las rocas de la Formación Arenisca de La Regadera y su disección por las quebradas que dieron origen a las gargantas, hoy ocupadas por conos de deyección y el intenso carcavamiento en los cauces ubicados más al norte de la zona del relleno.

Las fotografías de 1993 (C-2520, fotos 0109-0110), muestran el proceso de relleno en la zona 1; no existía aún la zona 2 donde se produjo el flujo. Para esa fecha ya se adelantaba un intenso proceso de extracción de materiales de construcción en la parte distal del cono de deyección de la quebrada Puente Blanco, por donde descendió el flujo, y se extraían igualmente materiales en el abanico formado por las quebradas Yerbabuena y Mochuelo.

Las fotografías de 1994, (C-2546, fotos 140-141), muestran que la zona 1 estaba siendo cubierta con pastos y se había intensificado el proceso de relleno en la zona 2, donde se generó el flujo (Fig. 3).

El vuelo tomado días después del deslizamiento (Figs. 5, 6 y 7), permite definir el comportamiento del flujo de basuras, su desplazamiento rotacional traslacional a lo largo del cauce de la quebrada, su disposición final, y la acción invasiva y de taponamiento que se presentó en el cauce del río Tunjuelo con los diferentes lóbulos.

## **ANALISIS DE AMENAZAS EN LA CUENCA DEL MOCHUELO**

En las últimas décadas se ha planteado de manera reiterativa la importancia en geología ambiental, de lo relacionado con las amenazas naturales y antrópicas, muchas veces magnificadas por la intervención humana, como en este caso. Sin embargo, las grandes ciudades colombianas han seguido creciendo, en la mayoría de los casos de manera caótica, construyendo viviendas y obras como el relleno de Doña Juana, en áreas expuestas a amenazas, que junto con su vulnerabilidad generan riesgos que hay que evaluar y mitigar.

En general, los estudios de amenazas han tenido como base metodologías aceptadas internacionalmente para la evaluación de riesgos, siendo la más utilizada la de INFRAPLAN/LANPLAN (1988), adecuada para cada región (CARDONA 1990, HERMELIN 1990a, 1993, VELÁZQUEZ & MEYER 1990, COHEMIS 1997 entre otros), las cuales siguen varios pasos o etapas fundamentales para el análisis de amenazas. Por último, es necesario establecer las medidas preventivas correctivas y de mitigación con el fin de eliminar o reducir las amenazas.

El haber realizado un análisis de amenazas pudo, de manera cualitativa, evidenciar que esta zona era y es de riesgo, para el diseño y construcción de una obra, que más que ser un relleno, es el apilamiento de desechos en una cuenca de alta pendiente, con cauces de drenaje rápidos, y sin un adecuado control.

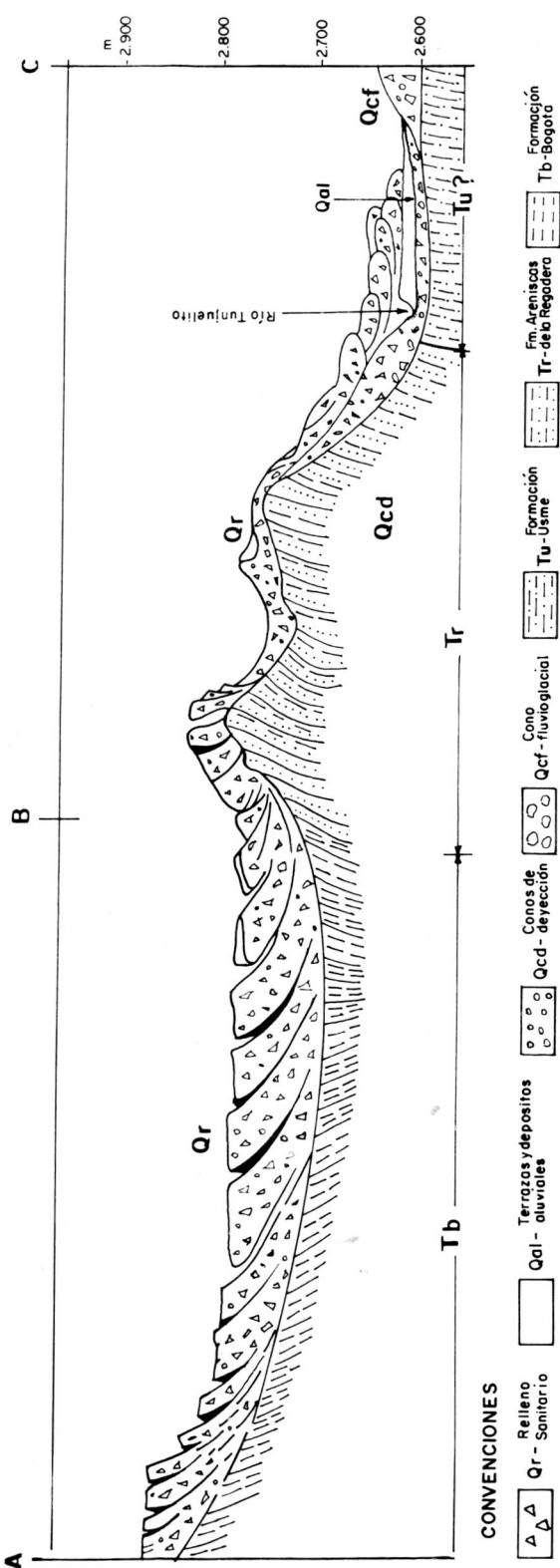
Antes del evento del 27 de septiembre de 1997, ya se habían presentado agrietamientos sobre la superficie del relleno en la zona 1, y se habían generado pequeños movimientos en masa, controlados temporalmente con la construcción de gaviones de protección y que no dejaron de ser aún una amenaza latente, con un alto riesgo para la población ubicada en la cuenca del río Tunjuelo, aguas abajo del sitio de Cantarrana.

El relleno de Doña Juana ha modificado de manera sustancial la cuenca del Mochuelo y las zonas aledañas a los cauces de las quebradas, en cuanto al impacto ambiental por la presencia de materiales contaminantes, inestabilidad de taludes, sobrecarga, erosión del suelo removido, infiltraciones, olores e impacto visual.

Debido a que el cauce del río Tunjuelo quedó totalmente ocupado por el flujo de basuras que en este tramo presenta un considerable espesor (30 m), y que dificulta la remoción rápida y necesaria de estos materiales, pero que será el procedimiento a realizar; este fenómeno requirió, entonces, del rediseño de un cauce alterno, con las especificaciones necesarias para que cumpla con las necesidades del flujo normal y de crecientes grandes del río, o alternativamente evacuar las basuras para que el río retome su cauce natural, se evite la contaminación de los acuíferos y que las crecientes del río Tunjuelo arrastren toda la basura y se afecten las viviendas ubicadas aguas abajo del sitio del deslizamiento.

La excavación del cauce alterno provisional para evacuar el represamiento que se generó por el flujo de basuras, permitió observar que solo a cinco metros de profundidad sobre los materiales aluviales y fluvoglaciales del cono del Tunjuelo, se aparecen rocas arcillosas, lo cual hizo más difícil el trazado del nuevo cauce para el río. Además es necesario tener en cuenta la descarga de la quebrada Yomasa, que presenta caudales altos, y el comportamiento dinámico del río.

De acuerdo a lo anterior, los cambios morfodinámicos que ocurrirían de manera natural y propios de cauces como los de las quebradas Puente Blanco y Yerbabuena-Mochuelo, hoy totalmente intervenidas desde sus nacimientos, están siendo afectados y obstruidos de tal forma que cuando éstos se presentan, generan una amenaza potencial, por el riesgo



que implica ocupar estas zonas de manera inadecuada. Además, el mal manejo de las aguas servidas y desechos, afecta la estabilidad del suelo, de las laderas y riberas del cauce, y se manifiesta con procesos de sobrecarga, reptación, erosión, socavamiento, deslizamientos, carcavamiento y saturación.

El proceso de urbanismo en los países subdesarrollados se caracteriza por la formación de asentamientos humanos no planificados y de condiciones socioeconómicas muy bajas. En la cuenca del río Tunjuelo y afluentes, estos fenómenos se han incrementado notoriamente en las últimas décadas y, en el avance de este proceso, se ocupan áreas cada vez menos aptas para urbanizar, como son las laderas pendientes e inestables de los cerros que limitan la cuenca; márgenes y vegas del tramo urbano del río principal y afluentes, y las zonas de antiguas explotaciones tanto en canteras de peña, sus vecindades y taludes, como en cercanías a las zonas de gravilleras en el valle aluvial, algunas de las cuales han generado riesgo por deslizamientos históricos.

Este fenómeno y la ocurrencia de varias tragedias por deslizamientos de tierra, inundaciones por crecientes del río y/o sus afluentes principales y recientemente por el flujo de Doña Juana, han hecho notar la gravedad y complejidad de la situación existente para la cual es necesario generar acciones de acuerdo con el marco institucional vigente. Con respecto al uso del suelo se reflejan problemas como la existencia de barrios y viviendas subnormales en el área, que se caracterizan por presentar una distribución y estructura física inadecuadas, servicios públicos deficientes y distribución urbanística irracional.

Lo anterior, permite deducir que el deslizamiento de Doña Juana constituye un ejemplo de riesgo antrópico, producto de la equivocada elección del sitio del relleno, del incumplimiento de las normas de diseño, de un manejo indebido, o de insuficiencia de los estudios previos. Se trata de un caso infrecuente, pero repetible en la misma zona, o en otras regiones y latitudes (MOJICA *et al.* 1998).

En el plan de contingencia del estudio de impacto ambiental, INGESAM (1986a), había considerado desde el punto de vista geomorfológico que un posible mal manejo del relleno

**Fig. 8. Perfil A-B-C, a lo largo del flujo rotacional traslacional, tomado de la Fig. 7. Se aprecia en el tramo A-B, el flujo sobre rocas de la Formación Bogotá que están cubiertas con geotextil, y en el tramo B-C, la parte de acumulación del flujo de basuras formando los diferentes lóbulos que llenaron y taponaron el cauce del río Tunjuelo. Perfil en dirección S-N a W-E.**

podría generar inestabilidad de las basuras, generándose riesgo por agrietamientos y hundimientos, al igual que las deficiencias en el drenaje podrían producir inconvenientes con el manejo de los lixiviados y biogases.

Se deben instalar indicadores de las deformaciones y movimientos importantes de las masas de basuras en los taludes y establecer un plan de seguridad geotécnica que permita monitorear cada uno de los factores que incidieron en el deslizamiento, para poder detectar con suficiente anticipación otro evento similar.

## CONCLUSIONES

La región seleccionada para el relleno sanitario de Doña Juana no presenta las condiciones básicas adecuadas para realizar un relleno que garantice estabilidad y un menor impacto ambiental de acuerdo a las normas establecidas a nivel internacional.

El flujo de basuras fue un movimiento en masa complejo con características de deslizamiento de tipo rotacional a traslacional, que solo afectó el material de basuras y suelos mezclados, apilados sobre la Formación Bogotá, en una superficie con geotextil.

El deslizamiento fue ayudado con la sobrecarga de basuras, la alta concentración y las presiones generadas por los biogases y los lixiviados almacenados allí por la reinyección y que no estaban siendo drenados adecuadamente, los cuales fueron los detonantes que pusieron en marcha esta amenaza previamente definida y que representaba un alto riesgo ambiental.

La acumulación de capas de bolsas plásticas sin romper y compactadas actuó también como superficie deslizante y pudo afectar localmente el drenaje de los lixiviados y gases.

Los lixiviados generados en el relleno no fueron drenados adecuadamente y por consiguiente se empezaron a acumular desde el comienzo de la operación de la zona 2. La acumulación de estos líquidos contribuyó al aumento de presiones internas de gases debido a que los lixiviados acumulados no permitían el flujo normal de los gases hacia la superficie y chimeneas. Estas presiones de gases disminuyeron aún más la capacidad de drenaje de los líquidos y se incrementaron con el tiempo, causando además una disminución de los factores de estabilidad del relleno.

La recirculación de los lixiviados, que comienza, aproximadamente en Julio de 1997, acelera el proceso de inestabilidad del relleno, hasta hacerlo fallar en Septiembre

27 de 1997. Aún sin la recirculación de los lixiviados, las condiciones de estabilidad habían disminuido con el tiempo, por lo tanto el relleno sanitario hubiera podido fallar sin la recirculación de lixiviados. La infiltración y la generación de lixiviados excedían la capacidad del sistema de drenaje para conducir los líquidos al río.

La presencia y acumulación de los biogases fue otro de los factores importantes en la movilidad del flujo, ya que en trabajos previos, se había concluido que las concentraciones de metano encontradas en el relleno de Doña Juana estaban en el rango de peligrosidad explosiva, por una alta migración lateral y vertical y por fallas en los diseños o en la construcción de los sistemas de drenaje y recolección de gases y lixiviados.

Las capas intermedias, de baja permeabilidad, contribuyeron a la deficiencia en el sistema de drenaje para la recirculación de los líquidos dentro del relleno y por lo tanto el sistema falló.

El análisis determina que en la zona del relleno, la susceptibilidad de que se presenten nuevos procesos de movimientos en masa es alta y afectaría de nuevo el cauce del río Tunjuelo por posibles represamientos, como efectivamente ocurrió en este caso, lo cual incrementa la amenaza, aumentando el riesgo de la población ubicada en las riberas del río.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al profesor Jorge Brieva del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, por la lectura y correcciones del manuscrito.

## REFERENCIAS CITADAS

- ACOSTA, J. & BELTRAN, W. (1987): Estratigrafía de la Formación La Regadera en el flanco occidental del sinclinal de Usme. (Trabajo de grado).- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, 185 P., Bogotá.
- AGUAS SUBTERRÁNEAS LTDA (1993): Relleno sanitario Doña Juana. Evaluación geológica, hidrogeológica y geofísica.- EDIS, Bogotá.
- BATES, R.L. & JACKSON ,J. A (1987): Glossary of geology.- American Geological Institute. Third Edition. Alexandria, Virginia.
- BÜRGL, H. (1957): Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores.- Boletín Geológico, Instituto Geológico Nacional, Vol. V, 2, p.113-185, Bogotá.
- CARDONA, O.D. (1990): Términos de uso común en manejo de riesgos.- I Seminario Andino de Geología ambiental; I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental; III Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburra, AGID REPORT, No. 13: Environmental Geology and Natural Hazards of the Andean

Region, Universidad EAFIT, Medellín.

CELIS, A.G. & ISAZA, C.G.F. (1982): Estudio de una central térmica para Bogotá, empleando las basuras que se recogen en la ciudad (Trabajo de grado).- Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

COHEMIS, A. (1997): Seminario sobre diseño, construcción y monitoreo de Rellenos Sanitarios.- Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

CUERVO, E. & RAMÍREZ, A. (1985): Estratigrafía y ambiente de sedimentación de la Formación Cacho en los alrededores de Bogotá (Trabajo de grado).- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, 168 p., Bogotá.

E.A.A.B (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá) (1997): Estudio de saneamiento ambiental y control de crecientes en la cuenca del río Tunjuelo.- Compañía de Estudios e Interventorías Ltda., Santafé de Bogotá.

\_\_\_\_\_. (1997a): Lixiviados del relleno sanitario Doña Juana y calidad de las aguas del río Tunjuelito.- Informe de avance. Octubre 10. Santafé de Bogotá.

GUTIERREZ, G. & COLEGIAL, J. (1987): Geología y aspectos geotécnicos de la parte central del sector denominado Ciudad Bolívar en el Distrito Especial de Bogotá (Trabajo de grado).- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.

HERRERA, J.G. & VILLAMIL, C.J. (1992): Saneamiento Ambiental.- Fondo Nacional Universitario, Santafé de Bogotá.

-HERMELIN, M. (1990a): Geología y Geología Ambiental.- I Seminario Andino de Geología ambiental; I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental; III Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburra, AGID REPORT No. 13: Environmental Geology and Natural Hazards of the Andean Region, Universidad EAFIT, Medellín.

\_\_\_\_\_. (1990b): Aspectos geológicos de los rellenos sanitarios.- Revista Universidad EAFIT, N° 75, Medellín.

\_\_\_\_\_. (1993): Medio ambiente y plan de desarrollo municipal.- Segundo Seminario Taller Municipio y Medio Ambiente; Cámara de Comercio de Medellín. Segunda edición, Santafé de Bogotá.

HUBACH, E. (1957): Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores.- Boletín Geológico, Instituto Geológico Nacional, Vol. V, 2, p. 93-113, Bogotá.

INGEOMINAS -DAPD (1988): Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá, p. 350, Bogotá.

INGESAM LTDA - C.A.R - U.R.S. (1986a): Proyecto sobre la disposición final de las basuras de Bogotá y de algunos municipios vecinos.- Varios Volúmenes. Estudio de Impacto Ambiental, Manual de operaciones y mantenimiento del relleno de Doña Juana; Selección y estudio de alternativas de sitios nuevos. Santafé de Bogotá.

\_\_\_\_\_. (1986b): relleno sanitario de Doña Juana. Estudio geotécnico y geológico del sector oriental de Bogotá, D.C.

INFRAPLAN/LANDPLAN NETH. PROJECT TEAM (1988): An approach to urban risk assessment for disaster mitigation planning.- AGID News, No 56, p. 28-32, Bangkok.

JULIVERT, M. (1961a): Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá.- Boletín Geológico, No 7, p. 5-36, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

\_\_\_\_\_. (1961b): El papel de la gravedad y de la erosión en las estructuras del borde oriental de la sabana de Bogotá. Boletín de Geología, No 8, p. 5-20, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

\_\_\_\_\_. (1963): Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras.- Boletín de Geología, Ns. 13-14, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

LITTLE D., A. (1998): Diagnóstico geotécnico y ambiental de las causas del deslizamiento en el relleno sanitario Doña Juana.- SADAT INTERNATIONAL, INC., Princeton, NJ, EUA. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Cambridge, MA, E.U.A.

LUPIEN ROSEMBERG ET ASSOCIES (1997): Evaluación de gases contaminantes, área de influencia relleno sanitario de Doña Juana.- Santafé de Bogotá.

MOJICA, J.; JORDAN, E.; AGUDELO, O.; SUAREZ, C.; CASTRO, S. & DELGADO, O. (1998): El deslizamiento de basuras de Dona Juana al sur de Bogotá en septiembre de 1997: un caso de riesgo «geológico» inducido por el hombre.- Terra Nostra, 98 (5), 16. Geowiss. Lateinam.-Kolloq. (Resúmenes), p.111-112., Bayreuth.

MORENO, J.M. (1998): El flujo de basuras en el relleno sanitario de Doña Juana, ocurrido el 27 de septiembre de 1997, Santafé de Bogotá, Colombia.- Ponencia presentada en el IX Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires, Argentina.

PÉREZ, G. & SALAZAR, A. (1971): Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe.- Geol. Colombiana, No. 10, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.

ROLANDO, A. P. & ROJAS, A.B. (1991): Caracterización de los gases producidos en el relleno sanitario Doña Juana (Trabajo de Grado).- Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

TABARES.J & OROZCO .J. (1992): Metodología para el diseño del relleno sanitario de Santa Rosa de Cabal, Risaralda.- II Simposio Latinoamericano sobre Riesgo Geológico Urbano. II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Pereira, Risaralda, Colombia.

USECHE, C.A, (1991): Análisis y elementos para la formulación de la política ambiental del manejo de residuos sólidos en Colombia (Trabajo Final).- Especialización - Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

VAN DER HAMMEN, T. (1995): Plioceno y cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores.- Análisis Geográficos No 24, Bogotá.

VELÁZQUEZ, A. & MEYER, H. J. (1990): Un ensayo de evaluación de las amenazas, de los riesgos y de los desastres en Colombia.- I Seminario Andino de Geología Ambiental, I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental; III Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. AGID REPORT, No 13. Environmental Geology and Natural Hazards of the Andean Region, Universidad EAFIT, Medellín.

VILLOTA, H. (1991): Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras.- IGAC, 1a. parte, Santafé de Bogotá.

ZALTZMAN, R. (1975): Manual sobre Desechos Sólidos.- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Traducción por la Sección de Ingeniería Ambiental.

*Manuscrito recibido, Agosto de 1999*

*Manuscrito aprobado para publicación, Agosto de 2001*

## LAMINA 1

**Fotografía A:** Panorámica del flujo de basuras en el relleno sanitario de Doña Juana, visto desde la corona donde se aprecian los bloques rotados y trasladados pendiente abajo. A la derecha se aprecia el escarpe formado por la Formación Areniscas de La Regadera, Unidad Geomorfológica Estructural Plegada. Nótese la diferencia topográfica, con respecto al nivel de base. Foto en dirección al norte.

**Fotografía B:** Detalle de las grietas y fallas de cizalla, producidas en la parte superior del relleno sanitario a partir de la corona del flujo, donde se aprecia los taludes en la basura, que alcanzan los 10 m de profundidad. Fotografía en dirección al oriente.

**Fotografía C:** Detalle del talud izquierdo del flujo de Doña Juana, donde se aprecian las grietas en la basura, el desplazamiento pendiente abajo y lo delgado del relleno sobre las pilas de basura (10 cm.), diferente a lo reglamentado en el manual de manejo. Foto en Dirección al norte.

**Fotografía D:** Detalle en primer plano del lóbulo central que se dirigió hacia el oriente y que está produciendo lixiviados. Al fondo se aprecia la distribución del lóbulo en dirección sur, invadiendo las áreas de explotación de materiales pétreos. Foto en dirección al occidente.

**Fotografía E:** Detalle del lóbulo inferior de basuras que descendió por la garganta formada en las Areniscas de la Regadera, a lo largo del cauce de la quebrada Puente Blanco, Nótese la distribución de las basuras en el lóbulo de la parte central y el lóbulo norte que continuo a lo largo del cauce del río Tunjuelo. Foto en dirección al occidente.

**Fotografía F:** Panorámica de la zona de ubicación del relleno Sanitario, donde se aprecian la zona montañosa (Unidad estructural plegada), formada por las Areniscas de la Regadera, donde el flujo salto el control litológico, y la garganta por donde fluyeron los conos de deyección. En la parte inferior izquierda los lóbulos finales de basura que taponaron el canal del río Tunjuelo, e invadieron las zonas de explotación de materiales pétreos. Foto en dirección al occidente.

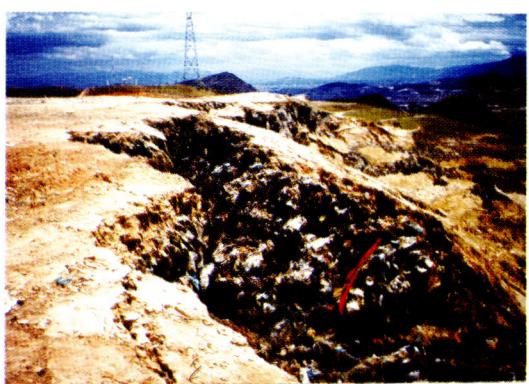
**Fotografía G:** Detalle del flujo de basuras cuando sobrepaso el control litológico de las Areniscas de las Regadera, invadiendo el campamento. En primer plano el frente del cono de deyección de la Quebrada Puente Blanco por donde se desplazo el flujo. Foto en dirección al noroccidente.

**Fotografía H:** Detalle del frente del lóbulo sur, donde se aprecia el cauce de la quebrada relleno de basuras, y al fondo se aprecia la garganta en las Areniscas de la Regadera. Foto en dirección al noroccidente.

**LAMINA 1**



A B



C D



E F



G H

