

**ANEXO 1. EFECTOS COMBINADOS DE “LA NIÑA” 98 – 99 Y EL  
TERREMOTO DEL 25 DE ENERO DE 1999 EN EL EJE CAFETERO DE  
COLOMBIA: TRANSFORMACIONES EN EL PAISAJE**

## **CISMID – II CURSO INTERNACIONAL MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL FENÓMENO EL NIÑO**

### **EFECTOS COMBINADOS DE “LA NIÑA” 98 – 99 Y EL TERREMOTO DEL 25 DE ENERO DE 1999 EN EL EJE CAFETERO DE COLOMBIA: TRANSFORMACIONES EN EL PAISAJE**

Viviana Aguilar<sup>1</sup>, Diana P. Mendoza<sup>2</sup>, Andrés Velásquez<sup>3</sup> y Myriam C. López<sup>4</sup>.

<sup>1, 2 y 3</sup> Observatorio Sismológico del Sur Occidente – OSSO, Cl.13 No. 100 – 00, Universidad del Valle, sede Meléndez, Torre de Ingenierías, tercer piso. A.A. 25928.

<sup>1,2,3</sup>, Participantes en el proyecto Gestión de Riesgos de Desastres ENSO en América Latina, LA RED – IAI.

[viaguila@osso.univalle.edu.co](mailto:viaguila@osso.univalle.edu.co), [dimendoz@osso.univalle.edu.co](mailto:dimendoz@osso.univalle.edu.co), [ave@tsunami.univalle.edu.co](mailto:ave@tsunami.univalle.edu.co)

<sup>4</sup>Corporación OSSO, Cra. 101 No. 15A – 64. A.A. 25928. [mylopez@osso.univalle.edu.co](mailto:mylopez@osso.univalle.edu.co)

## **RESUMEN.**

Las lluvias intensas y constantes que se manifestaron en la región del Eje Cafetero de Colombia, ligadas al fenómeno La Niña, desde mediados de 1998, propiciaron condiciones de inestabilidad en las laderas de las montañas, muchas de las cuales colapsaron durante el evento sísmico ocurrido el 25 de enero de 1999. Las lluvias continuaron a lo largo del año 1999, al igual que los movimientos de masa, causando severos efectos sobre el territorio, principalmente el 27 de febrero y el 25 de diciembre, y transformando el paisaje preexistente. Tomando como área de estudio una de 1960 km<sup>2</sup> ubicada dentro del Eje Cafetero, se evalúan el comportamiento de las precipitaciones y su correlación con el evento global ENOS, para un periodo de 20 años, el efecto combinado de las lluvias y del sismo sobre el paisaje y se desarrolla un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en condiciones de trópico húmedo de montaña.

## **INTRODUCCIÓN.**

El Eje Cafetero está ubicado en los Andes de Colombia y es de gran importancia nacional por su aporte económico y por ser una de las regiones más densamente pobladas del país (CRECE, DANE, IRD. 1999). En el año 1999, ocurrieron en la región simultáneamente dos fenómenos naturales que evidenciaron la susceptibilidad de la zona a los movimientos de masa. En primer lugar, el evento “La Niña”, que venía manifestándose como fenómeno global desde comienzos del tercer trimestre de 1998 (NOAA, 2001); a finales de enero y finales de febrero ocurrieron en la región lluvias torrenciales que alcanzaron niveles críticos. En segundo lugar, el 25 de enero, a las 1:19 p.m. LT, ocurrió un sismo de magnitud 5.9 con epicentro en el municipio de Córdoba

(Quindío), a 2 km al NE de la cabecera municipal, que ocasionó efectos en 28 municipios de los departamentos Quindío, Valle, Caldas, Tolima y Risaralda, afectando directamente unas 570.000 personas (CEPAL, 2000).

El sismo disparó movimientos de masa en toda la región epicentral, agrietamientos, hundimientos y, en algunos sitios, alteraciones en afloramientos de agua. Los movimientos de masa obstruyeron durante varios días las vías de acceso, complicando las labores de rescate, y los agrietamientos y hundimientos ocasionaron incremento en la inestabilidad de las laderas de la zona. Las lluvias que venían debilitando la estabilidad de las laderas con el incremento de su intensidad desde mediados de 1998, actuaron de manera conjunta con el sismo, generando movimientos de masa cosísmicos y disparando eventos posteriores, muchos de ellos en laderas previamente agrietadas por el sismo. La intensidad de las lluvias del 27 de febrero de 1999, generó avenidas torrenciales en el área epicentral; en diciembre del mismo año, un nuevo periodo de lluvias, que ocasionó efectos en toda la región andina, disparó flujos de lodo en el corregimiento de La Virginia, municipio de Calarcá (Quindío), asociados a la presencia de agrietamientos cosísmicos.

Para evaluar los efectos combinados de las lluvias y el sismo en el Eje Cafetero, se describe el comportamiento de las precipitaciones en el periodo 1982 - 1999 con énfasis en el periodo 1998 - 1999, se correlacionan de manera aproximada las condiciones Niña y Niño con las condiciones locales de precipitación, para periodos trimestrales, en una estación pluviométrica (La Bella, 1980 - 1999), y se relacionan deslizamientos inducidos por el sismo.

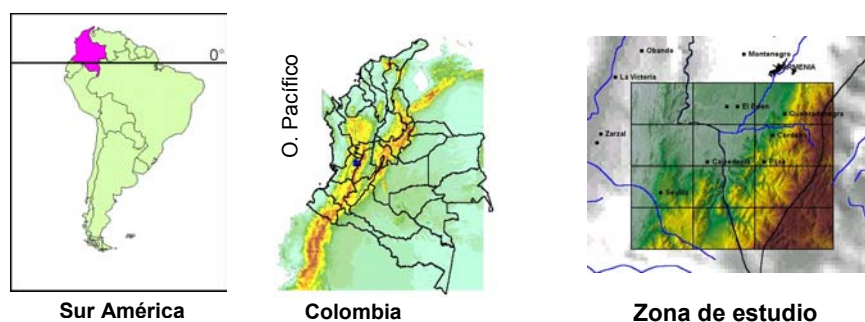


Figura 1 Localización de la zona de estudio.

Para tener una visión global de la susceptibilidad de la zona de estudio a movimientos de masa, se presenta un modelo desarrollado a partir de las variables geología, pendientes y humedad, aplicado a la zona comprendida entre las coordenadas (75° 59' 59" 00 W, 4° 30' 28" 1244 N) y (75° 33' 32" 5677 W, 4° 8' 43" 5356 N)<sup>1</sup>, en un área de 1960 km<sup>2</sup> de la región epicentral (Figura 1)

---

<sup>1</sup> Coordenadas geográficas (longitud, latitud), observatorio de Bogotá

### Variación estacionaria y acumulado de lluvias regionales, dic. 98 – feb. 99.

Las precipitaciones en la zona ocurren siguiendo un patrón bimodal, con dos períodos (estaciones) secos y dos lluviosos. En la Figura 2 se observa la curva estacionaria anual y en la 3 el acumulado diario antes y después del sismo del 25 de enero de 1999.

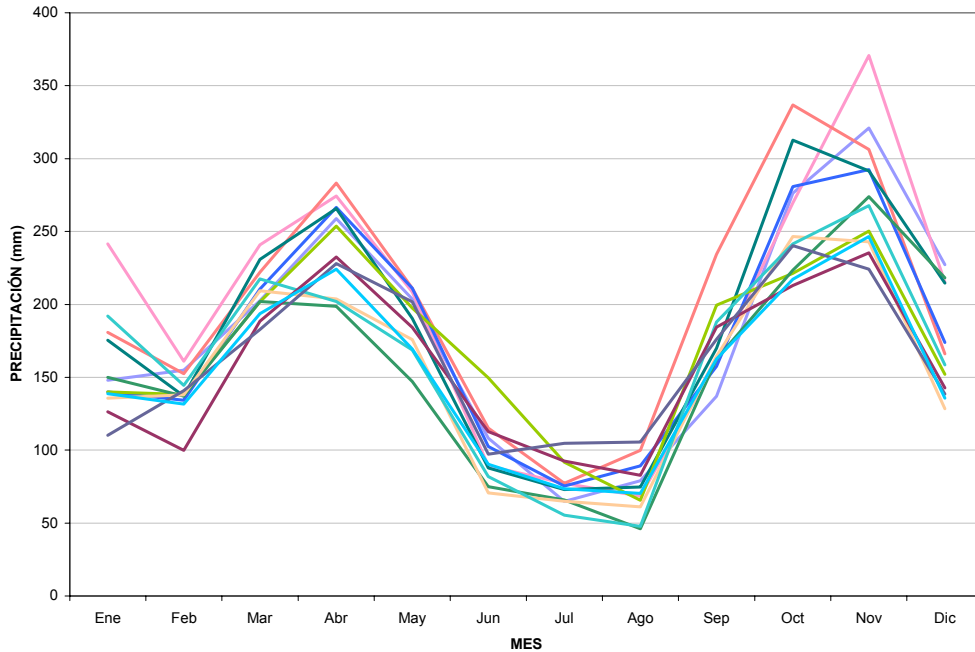


Figura 2 Variación estacionaria con base en medias mensuales multianuales del periodo 1982 a 1999 en 12 estaciones pluviométricas.

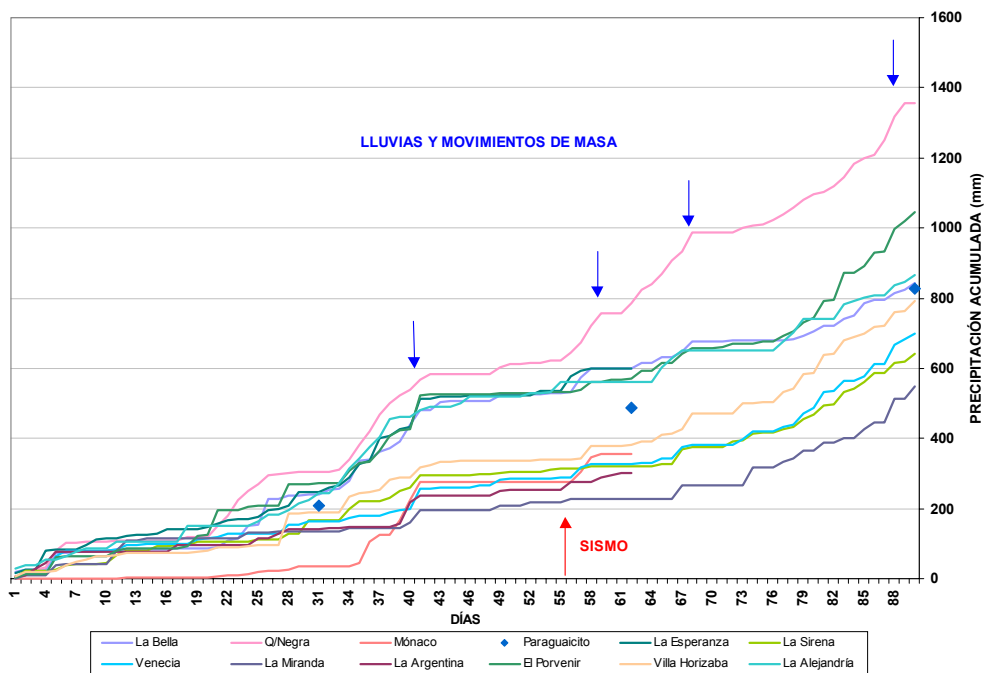


Figura 3 Acumulado de lluvias diciembre 1998 a febrero 1999.

## Correlación entre las condiciones globales La Niña y El Niño y las condiciones locales del Eje Cafetero.

Esta correlación se estableció entre la predicción climática para identificar condiciones La Niña - El Niño de la NOAA<sup>2</sup> y los registros de precipitaciones de la estación La Bella, de la red de estaciones pluviométricas de CENICAFE<sup>3</sup>, del periodo 1980 – 1999. Se calculó el valor promedio trimestral de estos registros: EFM = 547 mm, AMJ = 526 mm, JAS = 291 mm y OND = 783 mm; se obtuvo un indicador de correlación (*IND*) a partir de la relación

$IND = \frac{P}{\bar{P}}$ , (Figura 4), en donde *P* es la precipitación del trimestre y  $\bar{P}$  es la precipitación promedio del mismo trimestre.  $IND < 1$  significa que  $P < \bar{P}$ ,  $IND > 1$  que  $P > \bar{P}$  e  $IND \approx 1$  que  $P \approx \bar{P}$ .

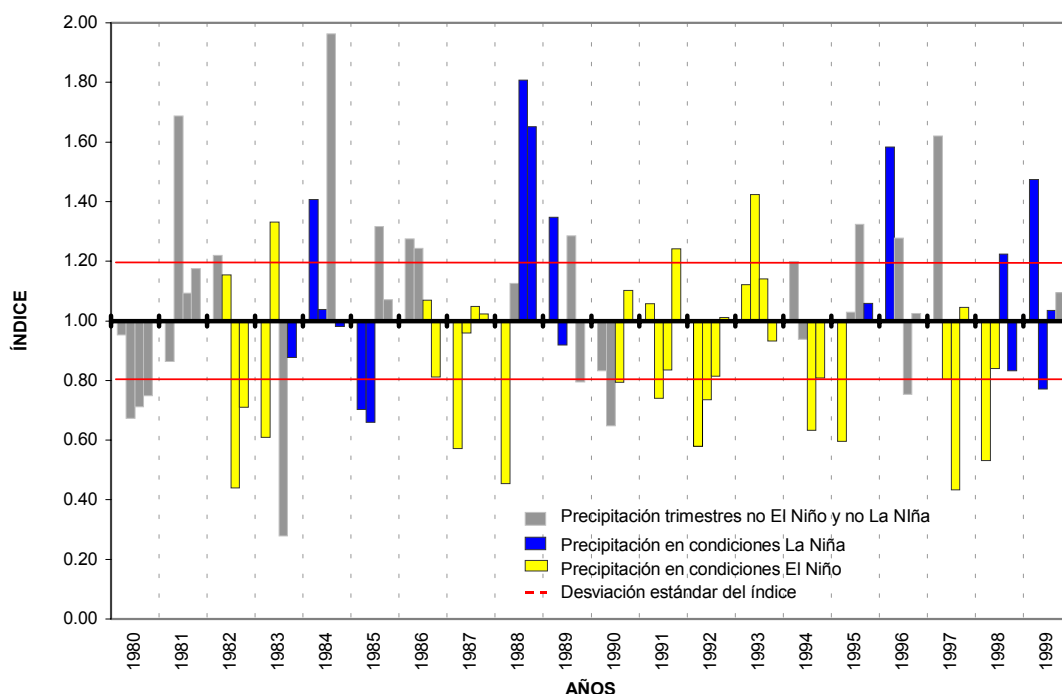


Figura 4 Correlación entre las condiciones globales La Niña y El Niño y las precipitaciones registradas en la estación La Bella, periodo 1980 – 1999.

A pesar de esta correlación, obsérvese que muchos trimestres superan los valores de desviación estándar, sin corresponder con periodos Niña o Niño. La tendencia es que en los períodos coincidentes con El Niño se presenten los mayores déficit de precipitación (del 30 al 40 % del promedio) mientras que los excesos son más frecuentes, incluidos varios periodos no catalogados como La Niña, e incluso más intensos (JAS 1984) que La Niña más fuerte (1988-1989).

<sup>2</sup> NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (USA).

<sup>3</sup> CENICAFE: Centro Nacional de Investigación del Café (Colombia).

### **Comportamiento de las precipitaciones en el periodo enero a diciembre del 99, en la zona de estudio.**

Según el IDEAM<sup>4</sup> en su informe climático de 1999 para la región, en el primero y los dos últimos bimestres ocurrieron lluvias por encima de lo normal asociadas con el fenómeno La Niña, que en muchos casos generaron movimientos de masa que ocasionaron víctimas e interrumpieron el paso de algunas vías, afectaron líneas vitales, asentamientos humanos e infraestructura, y se registraron excedentes de humedad en el sistema vegetación – suelo. En enero se declaró el estado de emergencia a causa del sismo del 25, fecha en la cual los acumulados de humedad habían alcanzado niveles muy altos, en algunos casos sobrepasado el acumulado medio anual de este trimestre; en septiembre los volúmenes excedieron a los promedios históricos y en diciembre hubo gran frecuencia de movimientos de masa asociados a formaciones superficiales altamente porosas: suelos residuales arenosos, cenizas volcánicas, rocas altamente meteorizadas de diferente composición y origen (IDEAM, 1999).

### **Efecto combinado La Niña (98 – 99) + Sismo (25 enero 99) en el Eje Cafetero.**

En trabajo de campo liderado por el OSSO, se identificaron dos tipos de efectos geológicos del evento combinado La Niña + Sismo: deslizamientos y agrietamientos. Estos efectos ocurrieron cosísmicos y postsísmicos. Los deslizamientos cosísmicos se localizaron principalmente en los cortes de las vías y en menor grado, en laderas naturales en las regiones más cercanas al epicentro; corresponden principalmente a suelo residual y suelos volcánicos en un área máxima de aproximadamente 1402 km<sup>2</sup> a una distancia máxima de 30 km del epicentro. Los agrietamientos generados por el sismo, en conjunto con el fuerte invierno desencadenaron un gran número de deslizamientos post sísmicos principalmente el 27 de febrero (OSSO, 1999; Aguilar y Mendoza, 2001; Forero, 2000).

Se documentaron 194 deslizamientos asociados al sismo: 11 eventos presísmicos, 53 cosísmicos, 81 postsísmicos (57 del 27 de febrero) y 49 eventos sin fecha. La mayoría de los 110 agrietamientos cosísmicos documentados, ocurrieron en cenizas volcánicas, que a largo plazo podrían convertirse en deslizamientos (OSSO, 1999). La Figura 5 muestra la distribución de deslizamientos producto de la interacción La Niña (saturación de los terrenos) y las vibraciones sísmicas, entre el 25 de enero y el 27 de febrero de 1999. La estrella corresponde al epicentro calculado por el OSSO, con menos de 20 km de profundidad.

---

<sup>4</sup> IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.

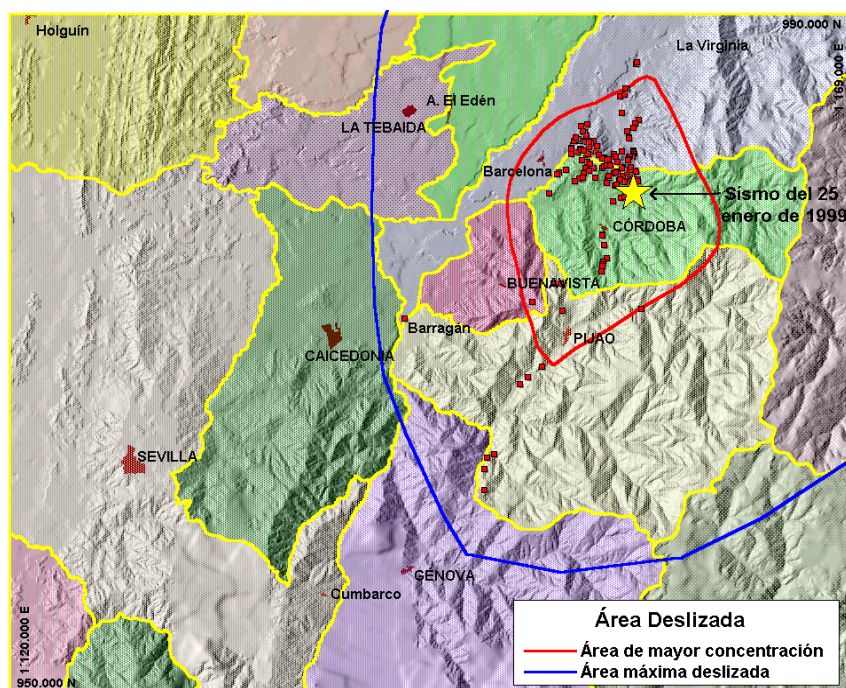


Figura 5 Movimientos de masa cósmicos (25 de enero) y por agrietamientos del terreno y lluvias del 27 de febrero de 1999.

El 25 de diciembre de 1999 ocurrieron en el sector de La Virginia, dos avenidas torrenciales que pusieron en peligro la vida de sus habitantes. Los residentes asociaron estos eventos con agrietamientos cósmicos en las laderas del Alto el Taburete, lluvias intensas y constantes desde noviembre y una “granizada” el 24 de diciembre que duró aproximadamente una hora, se depositó en las laderas y alcanzó una altura de 5 cm en la cancha de fútbol. Según el testimonio de un residente: “...por el terremoto la tierra quedó floja en la parte alta, y como el 24 llovió tanto, cayó semejante granizada, el granizo se fue depositando en las grietas... en la madrugada del 25 fue la primera avenida, bajó solo creciente y un poco de palizada; en el día no llovió, el hielo permaneció en los potreros, a las once de la noche bajó una segunda mucho mas fuerte... la avenida bajó en cinco ‘pulsos’, la tierra cimbraba y se oía un ruido muy fuerte, bajando con lodo, rocas y palizada, pasando por sobre el nivel de uno de los puentes de la quebrada que atraviesa la población...”. Como la gente estaba avisada y corrió a los sitios altos, no se perdieron vidas humanas (Aguilar y Mendoza, 2001).

### Transformaciones del paisaje

El estudio particular de geomorfología tropical está basado en el balance entre procesos de desgaste y acumulación de materiales residuales y mecanismos de remoción y deposición operando sobre estos productos residuales (movimientos de masa, sedimentación, etc.). También se ha considerado que la erosión química es el más poderoso medio de diferenciación vertical del relieve en estos ambientes; todo lo que sabemos acerca del medio ambiente caliente y húmedo indica condiciones favorables para la meteorización química, y el avanzado estado de deterioro de la roca y la profundidad de perfiles encontrados confirman la impresión de que las tasas de erosión podrían ser mayores, tal vez en orden de magnitud y espesor, que en climas fríos y medio ambientes áridos (Thomas Michael F., 1994; pp. 14 – 20, 304).

Pero la importancia de la precipitación como factor modelador del paisaje no se reduce a su influencia en los procesos de sedimentación y erosión. De acuerdo con la experiencia colombiana y costarricense, la intensidad y la frecuencia de lluvias son factores fundamentales en la cantidad y distribución de los deslizamientos (Restrepo y Velásquez, 1997; Mora y Vahrson, 1994).

### Modelamiento de susceptibilidad a los movimientos de masa.

Con base en experiencias previas y revisión de literatura se realizó un modelamiento en el cual se combinan, mediante álgebra de imágenes, tres variables previamente reclasificadas y agrupadas en rangos de valores de pixeles, desde baja hasta muy alta contribución a la susceptibilidad:

- Humedad del terreno con base en isohietas y zonas climáticas, en donde la mayor humedad promedio anual tiene más peso.
- Pendientes naturales (en términos de grados de pendiente). Las pendientes intermedias tienen el mayor peso en el modelo.
- Litología y estructuras. Los mayores pesos se asignan a zonas de trituración de rocas, de rocas más susceptibles a la meteorización y de sedimentos recientes.

El modelo, aplicado para la escala 1:100 000, se expresa como:

$$S_p = \text{rangos de humedad} \times \text{rangos de pendientes} \times \text{rangos geológicos.}$$

La experiencia anterior del OSSO es un modelo de susceptibilidad aplicado a escala 1:500.000 y desarrollado con base en esta misma ecuación (OSSO, 1995 a y b). En este modelo, que aquí se denota como  $S_o$ , fueron utilizados los valores de precipitación en lugar de la variable “rangos de humedad”, los valores de pendientes en términos de porcentajes y las unidades litológicas sin estructuras geológicas; además, los pesos y rangos de valoración de las tres variables fueron diferentes a los que se usaron en emodelo  $S_p$ .

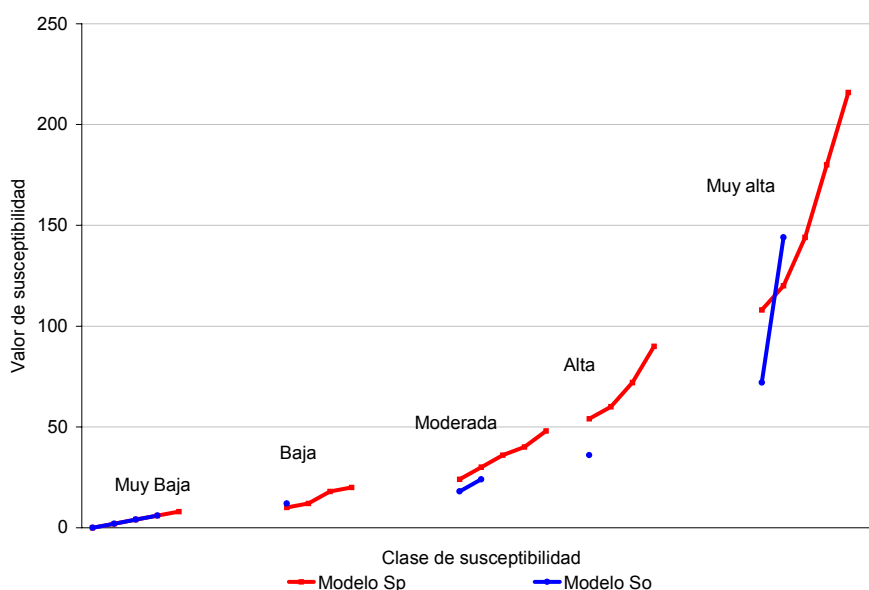
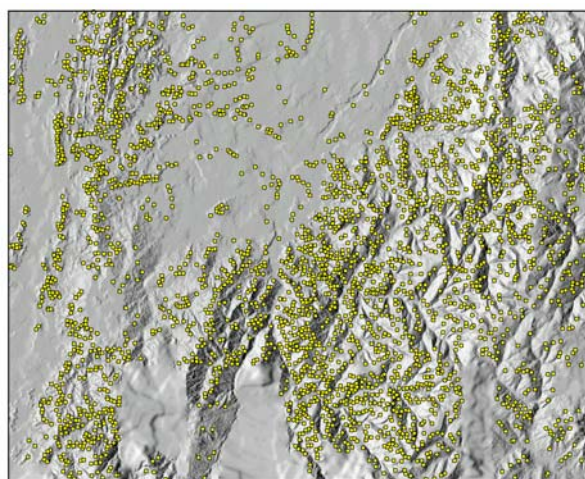
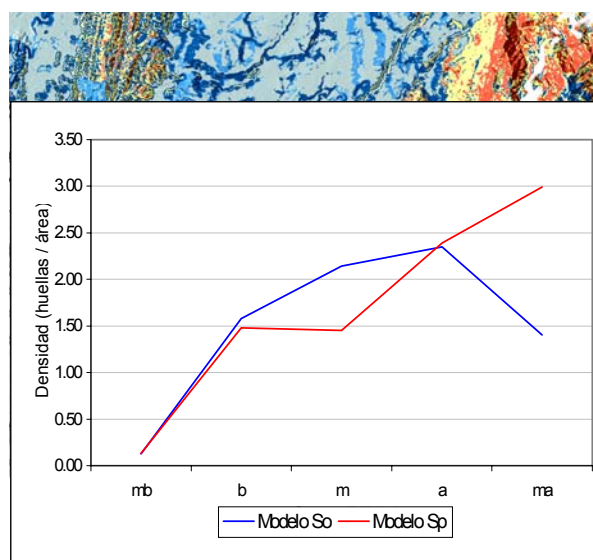


Figura 6 Curva de susceptibilidad para los modelos  $S_p$  y  $S_o$ .



a.



b.

c.

d.

Susceptibilidad <sup>5</sup>	Área So (km <sup>2</sup> )	Número de huellas	Densidad So	Área Sp (km <sup>2</sup> )	Número de huellas	Densidad Sp
Muy baja	332.61	42	0.13	400.58	53	0.13
Baja	345.34	545	1.58	144.73	214	1.48
Moderada	147.52	316	2.14	478.96	696	1.45
Alta	802.37	1885	2.35	432.53	1035	2.39
Muy alta	175.25	246	1.4	346.29	1036	2.99

<sup>5</sup> Las áreas de color gris en la figura 7 a y b corresponden a vacíos de información cartográfica.

Figura 7 Modelos de susceptibilidad a movimientos de masa aplicados a la zona de estudio: a. Modelo  $S_o$ , b. Modelo  $S_p$ , c. Inventario de deslizamientos. d. Densidad de movimientos de masa por área de susceptibilidad.

En la Figura 6 se observa que el valor de susceptibilidad aumenta de manera no lineal en ambos modelos pero que hay mayor continuidad de valores en  $S_p$ . En la Figura 7 (a y b) se observa que las fronteras entre clases de susceptibilidad se ajustan más naturalmente al terreno en el modelo  $S_p$ .

Sobre un modelo de sombras elaborado a partir de curvas de nivel cada 50 m, se inventariaron huellas de movimientos de masa; de esta interpretación resultaron 3 044 huellas (Figura 7c.), las cuales fueron superpuestas con los dos modelos. La curva de densidad del modelo  $S_p$  refleja un aumento de deslizamientos correspondiente con el crecimiento de la susceptibilidad, no así la curva de densidad del modelo  $S_o$ .

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La estación La Bella refleja las condiciones globales La Niña y El Niño en el periodo 1980 – 1999; sin embargo se sugiere repetir el ejercicio con otras estaciones de la zona para poder decir algo más concluyente respecto a la correlación de estos fenómenos globales y su influencia en la región del Eje Cafetero de Colombia, porque, como se observa en la figura 4, la variabilidad de la precipitación incluye diversos trimestres húmedos y secos con valores superiores a la desviación estándar, que no corresponden con períodos Niña o Niño Según NOAA.

Las curvas de masa de precipitaciones entre diciembre de 1998 y febrero de 1999, indican que a la altura del 25 de enero, fecha del evento sísmico de 1999 en el Eje Cafetero, y del 27 de febrero, los suelos estarían saturados porque los volúmenes de precipitación acumulados superaron en gran magnitud a los acumulados medios para este trimestre. Esta situación, vista a nivel local en la estación La Bella, está correlacionada con el evento global La Niña ocurrido entre 1998 y 1999.

Los efectos ambientales del evento combinado lluvias más sismo se presentaron a corto, mediano y largo plazo, puesto que ambos eventos actuaron como preparadores y como disparadores de movimientos de masa. Las lluvias de finales de 1998 prepararon el terreno (presísmico), el sismo y las lluvias dispararon movimientos de masa, el sismo agrietó el terreno (cosísmico) y las lluvias prepararon y dispararon movimientos de masa (postsísmico).

En esencia, las lluvias de 1999 pusieron en evidencia la gran susceptibilidad de este territorio a ser transformado por movimientos de masa. Es urgente profundizar en el estudio de la influencia de las lluvias en la transformación de los paisajes geomorfológicos de los ambientes tropicales y húmedos de montaña.

Las observaciones anotadas sobre los modelos de susceptibilidad a movimientos de masa en la zona de estudio, permiten concluir que el modelo  $S_o$ , desarrollado para análisis a escala 1:500 000, no es apropiado para la escala 1:100 000. A esta escala, el modelo  $S_p$  es una mejor aproximación a la zonificación de la susceptibilidad a movimientos de masa en la zona de estudio, no obstante limitaciones de las variables, tales como vacíos de información, y por consiguiente las limitaciones del modelo.

El modelo  $S_p$  muestra que el 64.2% del total de la zona de estudio presenta potencial entre moderado a muy alto de susceptibilidad a movimientos de masa. Surge la necesidad de plantear estudios que evalúen el grado de amenaza y la vulnerabilidad de las comunidades y que los resultados sean tenidos en cuenta para la planificación del desarrollo de la región.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

**Aguilar V. y Mendoza D.** Aproximación a la Evolución del Paisaje en El Eje Cafetero: Modelamiento de Movimientos de Masa. Tesis Ingeniería Topográfica. Cali Universidad del Valle: **2001**.

**CEPAL.** El Terremoto de Enero de 1999 en Colombia: impacto socioeconómico del desastre en la zona del Eje Cafetero. Bogotá: **1999**.

**FORERO, C.A.** Caracterización Geotécnica General del Subsuelo de Armenia, Colombia. En Boletín Colombiano de Geotécnica. No 8. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotécnica, **2000**.

**IDEAM.** Informe Ambiental Condiciones Hidroclimáticas y Ambientales en Colombia. Diciembre de **1999**. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co).

**CRECE, DANE, IRD.** Dinámicas Socioeconómicas del Espacio Colombiano. Bogotá: **1999**. 147 p.

**MORA C., Sergio y VAHRSON W. G.** Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol. XXXI, No. 1, **1994**. pp. 49 – 58.

**NOAA.** <http://www.noaa.gov/>. **2001**.

**OSSO Observatorio Sismológico del SurOccidente. a.** Análisis De Amenazas Naturales, Vulnerabilidad Y Riesgos Para Las Redes De Transporte Del Plan Para La Masificación De Gas. Cali: Osso Para Ecopetrol, Contrato Png. 94 – 099, Parte III, **1995**.

----- **b.** Apoyo a la Recuperación de la Zona Afectada por el Terremoto del Atrato Medio en 1992. Cali: PNUD. Proyecto Col. 95 / 009 / 10., **1995**.

----- **c.** Evaluación de Riesgos Geológicos, Aptitud de Terrenos y Acompañamiento Técnico a los Campesinos para la Reconstrucción en la Provincia Campesina de Entreríos, Municipios Córdoba y Cálarca Zona del Terremoto del Quindío. Cali: Osso para Swissaid, Informe final, **1999**. 61p.

**RESTREPO, C. y VELÁSQUEZ, A.** Resiliencia de los Ecosistemas Tropicales de Montaña Frente al Cambio: Biodiversidad, Procesos y Deslizamientos de Tierra. Cali: OSSO para COLCIENCIAS, **1997**. Propuesta, 62p.

**THOMAS F. MICHAEL.** Geomorphology in the Tropics, a Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes. U.K: **1994**. 460 p.