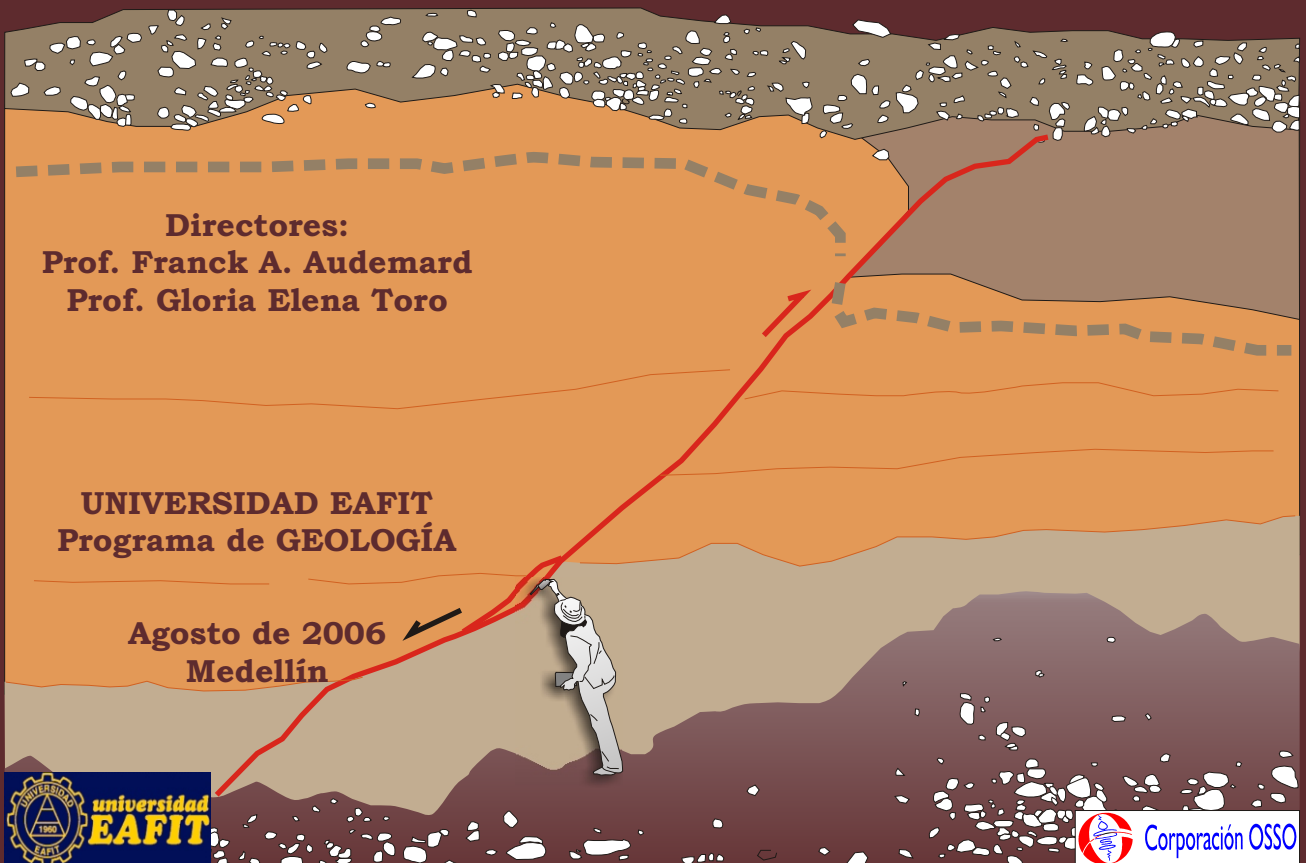


**ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA  
EN EL PIEDEMORTE DE LAS CORDILLERAS  
CENTRAL Y OCCIDENTAL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA  
-CONTRIBUCIONES PALEOSÍSMICAS**



**MYRIAM CARLOTA LOPEZ CARDONA**

**Trabajo de grado para optar al título de Maestría  
en Ciencias de la Tierra**



**ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES  
DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL  
CAUCA, COLOMBIA - CONTRIBUCIONES PALEOSÍSMICAS**

Trabajo de grado para optar al título de Maestría en Ciencias de la Tierra

Por:

**MYRIAM CARLOTA LÓPEZ CARDONA**

Directores:

PROF. FRANCK A. AUDEMARD  
PROF. GLORIA ELENA TORO

**UNIVERSIDAD EAFIT**  
Programa de GEOLOGÍA

Medellín  
Agosto de 2006

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de grado se llevó a cabo en el marco del proyecto de investigación “Hacia un modelo de la sismicidad del Sur-Occidente Colombiano: investigaciones paleosísmicas en la región del Valle del Cauca”, COLCIENCIAS (Código 1106-05-10117), en el cual participaron el Observatorio Sismológico del Sur occidente-OSSO- de la Universidad del Valle, la Corporación OSSO, la Universidad EAFIT y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS. Gracias a las personas que forman parte de estas instituciones:

COLCIENCIAS financió parte de mi matrícula en la Universidad Eafit.

De manera muy especial agradezco a la Corporación OSSO por el respaldo institucional. El profesor Hansjürgen Meyer, director ejecutivo e investigador principal del OSSO lo hizo posible.

El Profesor Franck A. Audemard, jefe del departamento de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS y profesor de la Universidad Central de Venezuela; durante sus asesorías en Colombia, en el trabajo de oficina y de campo incansable y generoso pedagogo, siempre dispuesto a la discusión crítica y divertida!; es director principal de este trabajo de grado en el tema de la paleosismicidad

La profesora Gloria Elena Toro, también directora de este trabajo en temas de geocronología y estratigrafía y el profesor Michel Hermelín, asesor del proyecto, ambos de la Universidad EAFIT. Su constante interés en el Cuaternario de Colombia, generó el espacio para los estudios de maestría.

El profesor Andrés Velásquez, director del OSSO y profesor de la Universidad del Valle, sostuvo las riendas del proyecto.

Siempre estaré en deuda con Gloria y Doña Geno por la hospitalidad que tuvieron con migo cuando llegué a Medellín.

Por último y no por eso menos importante, mis agradecimientos van para mi amigo de siempre, colega y esposo Mario Moreno-Sánchez. Las discusiones que tuvimos sobre este tema fueron muy importantes... al menos para mí!. Mario puso el arte en los dibujos que presento en este documento.

*...Confiamos en que la mente estará limitada por una realidad externa genuina; esta realidad, a su vez, debe ser dirigida al cerebro por nuestros sentidos, igualmente imperfectos, todos remendados, aparejados provisionalmente entre sí por este proceso enloquecedoramente complejo que llamamos evolución.*  
- Stephen Jay Gould (1997),  
Caracoles siniestros y mentes rectas, p. 227-

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	i
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Localización.....	3
<b>2 ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
2.1 Neotectónica y geología del Cuaternario.....	5
2.2 Sismicidad.....	6
2.2.1 Registro Instrumental .....	6
2.2.2 Registro macrosísmico – Efectos sismogeológicos.....	8
<b>3 GEOTECTÓNICA .....</b>	<b>10</b>
3.1 El graben interandino o foso del Cauca .....	11
3.2 Geología de la región de estudio.....	12
3.2.1 Estratigrafía .....	12
3.2.1.1 <i>Unidades de la Cordillera Central.....</i>	<i>12</i>
3.2.1.2 <i>Unidades cenozoicas de la Cordillera Occidental.....</i>	<i>15</i>
3.2.1.3 <i>Unidades cenozoicas del piedemonte occidental de la Cordillera Central ..</i>	<i>15</i>
3.2.2 Estructuras paralelas a las cordilleras.....	16
3.2.2.1 <i>Reportes de actividad reciente del sistema de fallas NS .....</i>	<i>17</i>
3.2.3 Estructuras transversales a las cordilleras .....	20
3.2.3.1 <i>Sistema ENE.....</i>	<i>20</i>
3.2.3.2 <i>Reportes de actividad reciente del sistema de fallas ENE .....</i>	<i>20</i>
3.2.3.3 <i>Estructuras NW .....</i>	<i>21</i>
3.2.3.4 <i>Reportes de actividad reciente del sistema de fallas NW.....</i>	<i>21</i>

<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>EVIDENCIAS DE ACTIVIDAD TECTÓNICA EN LA REGIÓN DE ESTUDIO... .....</b>	<b>26</b>
5.1	Rasgos geomorfológicos y estratigráficos Cordillera Central .....	26
5.1.1	Sector río Bugalagrande .....	28
5.1.2	Sector Tuluá.....	34
5.1.3	Sector Sonso .....	46
5.1.4	Sector Amaime .....	59
5.2	Modelo estructural propuesto para la cordillera central .....	64
5.2.1	Sistema de cabalgamiento NS .....	64
5.2.1.1	<i>Crecimiento activo de pliegues preexistentes.....</i>	<i>64</i>
5.2.1.2	<i>Escarpe de flexura.....</i>	<i>67</i>
5.2.1.3	<i>Variaciones en el comportamiento del drenaje.....</i>	<i>68</i>
5.2.2	Conexión con el sistema transpresivo ENE.....	68
5.2.3	Espacios de acomodación.....	70
5.2.4	Interacción de estructuras: rampas laterales y segmentación .....	70
5.3	Rasgos Geomorfológicos y estratigráficos Cordillera Occidental.....	73
5.4	evidencias de deformación tectónica en el valle del río Cauca .....	81
5.5	Datos geocronológicos.....	85
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>87</b>
6.1	Estilo estructural regional .....	87
6.2	relaciones de las fallas con los esfuerzos principales .....	91
6.3	Amenaza Sísmica.....	94
	RECOMENDACIONES.....	100
	REFERENCIAS.....	102

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Localización de la región de estudio. Arriba izquierda mapa geotectónico de Colombia y medidas geodésicas de desplazamiento senso Trenkamp et al. (2002). 1: Abanico del Quindío; 2: Abanico de Ibagué; 3: Abanico de Tuluá. El modelo digital del terreno se realizo a partir de datos del STRM utilizando los programas 3dem y Surfer. ....	4
Figura 2. La sismicidad superficial (cuadros pequeños rojos) registrada por la Red Sismológica del SurOccidente en el piedemonte de las cordilleras, delimita dos segmentos del sistema de fallas del Cauca. El segmento Cauca-Cali y el segmento Cauca-Norte del Valle. Los nidos de sismicidad al norte de Cali son generados en canteras (Tomada de Meyer et al., 2004). ....	7
Figura 3. Geología de la región de estudio. Tomada y modificada de Nivia (2001). ....	14
Figura 4. Esquema de la distribución de unidades litológicas y sistemas de fallamiento en la Cordillera Central. Al occidente del río Cauca la Falla Cauca también conocida como Cauca-Patía, al oriente del río Cauca las fallas Cauca-Almaguer, Silvia-Pijao y San Jerónimo paralelas a la Cordillera conforman el conjunto de fallas al que muchos autores se refieren como Sistema de Fallas de Romeral. ....	18
Figura 5. Escala de tiempo donde se limitan las observaciones de terremotos (redibujada de tomada de <a href="http://www.imagenes.com/imagenes/timescl2.GIF">www\\Imágenes\timescl2.GIF</a> , consultada en Agosto de 2002). ....	23
Figura 6. El piedemonte occidental de la Cordillera Central esta conformado por una superficie de aplanamiento levantada, una zona de colinas bajas y la llanura aluvial reciente. Modelo de elevación del terreno generado mediante el programa Surfer® a partir de curvas de nivel cada 25 m (plano digital de la CVC). ....	27
Figura 7. Modelo de elevación digital del terreno (realizado a partir de datos del STRM) de los sectores Río Bugalagrande y Tuluá vistos desde el sur. En líneas punteadas los lineamientos mas destacados en esta proyección. Las fallas inversas no fueron trazadas en planta, pero se pueden observar en la Figura 18. Con números encerrados en círculos las localidades mencionadas en este trabajo. El relieve está exagerado 15 veces. ....	29
Figura 8. Arriba mosaico fotográfico del sector Río Bugalagrande. Anticlinal de Andalucía y depósitos cuaternarios. Vista hacia el sur desde la carretera a Galicia. Abajo dibujo esquemático interpretativo que muestra las estructuras geológicas	

principales y la ubicación de las secciones detalladas en las figuras 9 y 10. Dibujó Mario Moreno-Sánchez. ....	30
Figura 9. Detalle de la Figura 8. Ts representan superficies de estratificación inclinadas al este, de rocas pertenecientes a la Formación La Paila. Esta unidad esta cubierta parcialmente por depósitos cuaternarios, sin discriminar en el esquema. Qs, en amarillo, corresponde a la superficie más conspicua del Cuaternario en el área (La Llanada) con inclinación hacia el este. Dibujó Mario Moreno-Sánchez. ....	31
Figura 10. Detalle de la Figura 8. Ts representa superficies de estratificación inclinadas al este, de rocas pertenecientes a la Formación La Paila. Esta unidad aflora en la parte alta de la vertiente del Río Bugalagrande y está cubierta en la parte baja por depósitos cuaternarios que conforman diferentes niveles de terrazas, siendo Qt6 la más antigua y Qt1 la más reciente. Qs corresponde a la superficie de La Llanada. Las terrazas Qt6 inclinadas suavemente hacia el oeste, representan remanentes de la erosión de Qs. Dibujó Mario Moreno-Sánchez. ....	32
Figura 11. Fallas observadas sobre la carretera que conduce de Bugalagrande a Galicia. Arriba, DEM del sector Bugalagrande-La Llanada-Galicia donde se resaltan estructuras ENE. Los puntos 1, 2 y 3 corresponden a mediciones de planos de falla. Inferior izquierda, falla de ángulo alto con desplazamiento en el sentido del buzamiento tomado en el punto 3. Inferior derecha, falla de rumbo tomada en el punto 1. En el punto 4 se midió plano de falla relacionado con grieta en eje anticlinal .....	33
Figura 12. Mapa geomorfológico y estructural del sector de Tuluá. Abombamientos: 1) Río Morales, 2) El Ahorcado, 3) Sur Río Tuluá 4) Frente Picacho. Trincheras: A) “Carreteable Oreja Norte”, B) “Cara Norte Oreja”, C) “Cara Sur Oreja”, D) “Variante Tuluá-N”, E) “Variante Tuluá-S”, E) “El Ahorcado”, F) “Sur Río Tuluá”. ....	35
Figura 13. Arriba, esquema de localización de afloramientos del Sector Tuluá con los retrocabalgamientos identificados y representados en proyección estereográfica de las principales fallas observadas. Abajo, dibujo de la Variante Tuluá vista desde el este que corta el abombamiento de la terraza del río Morales. En el talud norte de la vía es evidente una falla de vergencia al oeste. A, B, C, D y E nomenclatura de la Figura 12. ....	36
Figura 14. Exposición de afloramiento Carreteable Oreja Norte. Arriba izquierda vista desde el norte donde resalta la falla de vergencia este desplazando el nivel de gravas que suprayace en discordancia unidades de la Formación La Paila. Arriba derecha detalle del mismo plano de falla cortando la secuencia de sedimentos finos del Cuaternario y sobrecorriendo un paleosuelo (en color mas oscuro ubicado debajo de la escala de madera que mide 1m). En la fotografía inferior izquierda el mismo sector alejado. En la derecha se resaltan los niveles de arenas, cenizas y el paleosuelo sobrecorrido. ....	37

- Figura 15. Afloramiento Cara Norte Oreja. Arriba y centro, Aspecto morfológico del escarpe y secuencia de fallas imbricadas (desde 1 hasta 9) que emergen a través de planos de estratificación de la Formación La Paila (Tp) hasta alcanzar el horizonte de gravas (Cg) del Cuaternario. P: paleosuelo en cuña coluvial. Abajo, detalles del sitio donde se dató un paleosuelo (P), (i) estructuras de inyección. Los números dentro de las proyecciones estereográficas corresponden a los datos consecutivos de fallas. .... 38
- Figura 16. Afloramiento “Cara Sur Oreja”, El nivel “guía” de gravas (Cg) que suprayace en discordancia las unidades de la Formación La Paila (Tp) es desplazado por fallas inversas de vergencia al este. En este sitio resalta el plegamiento de las unidades de la Formación La Paila y la concordancia de la topografía actual con la estructura. Corte N80W. .... 39
- Figura 17. Afloramiento “Variante Tuluá”. Arriba, las fotografías tomadas en el talud sur de la vía son continuas, ortogonales al talud y con mínimo traslape. En los esquemas se resalta el crecimiento progresivo de fallas de vergencia este, el engrosamiento de la capa Csp en el pie de la falla y el adelgazamiento en el eje de la charnela o en el bloque colgante. Abajo, un poco más al este de las anteriores la capa Csp se adelgaza en forma de cuña bajo Csm. .... 40
- Figura 18. Afloramiento Variante Tuluá. El nivel de gravas suprayace en discordancia las unidades del Neógeno y es afectado por fallas inversas de vergencia este que emergen en secuencia desde 1 hacia 4 a través de planos de estratificación de la Formación La Paila. (P) paleosuelo sobrecorrido por la falla. La fotografía superior fue tomada antes de limpiar el afloramiento. La escala mide un metro. .... 41
- Figura 19. Afloramiento “Variante Tuluá-N”. Corte en la cara norte de la vía. Una falla de dirección general NS y vergencia al oeste emerge plegando los depósitos superficiales, desplaza el nivel de gravas guía y se propaga hacia las capas de arenas (Csp, Csm). El horizonte Csp es engrosado en el seno del pliegue y delgado en la charnela. .... 42
- Figura 20. Arriba: Expresión morfológica del escarpe El Ahorcado. Abajo izquierda, trinchera excavada en dirección oeste - este para una acometida de servicios públicos; al fondo la 14 de Tuluá; sobre el extremo este en la cara norte se documentó la cuña coluvial. Abajo derecha, con tachuelas de colores señalados los diferentes horizontes de la cuña coluvial. .... 43
- Figura 21. Trinchera *El Ahorcado*. En el piso de la trinchera el horizonte Gc representa el tope de la terraza. El paleosuelo P1 postdata la terraza. Ga, Agr y Agu representan episodios de coluviación del escarpe. El paleosuelo P2 con una edad anterior que el paleosuelo P1 al igual que el paleosuelo P4 más antiguo que el Paleosuelo P3 y P5 más antiguo que los anteriores indican un retrabajamiento progresivo del escarpe concomitante con episodios de crecimiento del mismo. El paleosuelo P6 representa el inicio de formación del suelo actual. .... 44

Figura 22. Escarpe *Sur Río Tuluá*. Arriba emergencia de falla inversa de vergencia oeste. En el dibujo interpretativo se muestra una falla de vergencia al este. El conjunto de ambas estructuras forma la colina de presión. En las figuras de abajo un detalle de la falla 1 donde se muestran pliegues de arrastre que confirman el carácter inverso de esta estructura. A la derecha un pop-up de escala centimétrica formado al parecer en un paleosuelo. .... 45

Figura 23. Sector Saliente de Buga. Arriba a la izquierda, mosaico fotográfico tomado en dirección norte sobre el eje del Anticlinal de Sonso. Arriba derecha, dibujo esquemático del Anticlinal de Sonso con las fallas principales. El anticlinal es asimétrico con vergencia al oeste; las fallas inversas se sitúan paralelas al rumbo y hacia los flancos de la estructura, las fallas normales se encuentran en la zona de mayor estiramiento sobre la charnela. Izquierda, modelo STRM de la Saliente de Buga donde se ubica la Cantera El Vínculo. En este modelo se trazaron las estructuras mas regionales. .... 47

Figura 24. Arriba, mapa topográfico del extremo sur de la Saliente de Buga. En el recuadro se muestra la ubicación de la Cantera El Vínculo. En el centro, flanco oeste del Anticlinal de Sonso cortado por los trabajos de la Cantera El Vínculo. Abajo, terminación sur del Anticlinal de Sonso vista desde la carretera Palmira-Buga. .... 48

Figura 25. Perfiles topográficos en dirección este-oeste, elaborados con datos del STRM, tomados en el piedemonte occidental de la Cordillera Central entre el Sur de la población de Sonso y Buga. El Anticlinal de Sonso es una estructura que gradualmente incrementa su expresión de sur a norte. La estructura culmina al este de la población de Buga, donde se ven por lo menos tres niveles de terrazas que se desarrollan sobre el anticlinal. Los abanicos aluviales recientes al sur de Buga se han depositado atrás de esta estructura. .... 49

Figura 26. Localización de las fallas reconocidas en la Cantera El Vínculo representadas con sus proyecciones estereográficas individuales. Arriba, a la derecha: proyecciones totales. Los números son consecutivos de las fallas. .... 50

Figura 27. Arriba, Anticlinal de Sonso tal como aparece en la cantera El Vínculo. Abajo, detalle del sector señalado en el recuadro arriba. Se resalta la posición de las fallas normales con respecto a la flexura principal del anticlinal. Las fallas inversas están distribuidas a través de toda la estructura. También son notorias las superficies de orden 7 y 8 (números encerrados en círculo) que fosilizan algunas fallas y pliegues. .... 51

Figura 28. Detalle de la Figura 27 en el costado este de la Cantera El Vínculo. Plegamiento monoclin. Las lodolitas y arenitas (Tp4 a Tp8) aparecen en discordancia en el flanco hundido de la estructura. A la derecha de la fotografía las secuencias son paraconformes, por tanto la superficie generada podría corresponder a un orden 7 o mayor. Asociado al plegamiento existen una serie de fallas menores principalmente inversas (números 1 a 7). .... 52

- Figura 29. Retrocabalgamiento Sonso (datos de falla 19 y 21). Tpc y Tpa corresponden a sedimentos de la Formación La Paila. Hacia la base niveles de areniscas de color pardo (naranja en el esquema de abajo) suprayacidos por niveles de gravas (Tpc) estratificadas con estructuras de erosión en la base. El desplazamiento neto es cercano a los 3 metros. .... 53
- Figura 30. Arriba, fotografía de la falla normal reactivada como falla inversa. Abajo, dibujo interpretativo. En la parte inferior de la falla el desplazamiento de niveles de la Formación La Paila (Tp1 y Tp2) aparece como normal mientras que en la parte superior el desplazamiento de los niveles de caliche indican que el fallamiento más reciente es inverso. El nivel de gravas cuaternario (Qs) al parecer no está afectado, sin embargo los niveles Qs (?) si lo están. .... 54
- Figura 31. Arriba derecha, Retrocabalgamiento Sonso correspondiente al dato de falla 18. Abajo derecha, dibujo interpretativo de la esta falla inversa con vergencia al este afectando rocas de la Formación La Paila (Tp) y depósitos cuaternarios (Qc) . Izquierda fotografía del plano con estrías en el que sobresalen guijos de cuarzo con “sombras” de arcilla tal como se ilustra en el esquema de la izquierda inferior; las flechas indican el sentido del movimiento. .... 55
- Figura 32. Pequeño graben formado entre las fallas normales 12 y 13. La falla 13 es fosilizada por una superficie de erosión más antigua. La falla 12 es más reciente que la superficie de erosión. Esto sugiere que el graben fue formado durante dos fases diferentes de actividad tectónica. Originalmente esta estructura comenzó como un semigraben. La superficie visible en la parte superior de la fotografía corresponde a un terraplén dejado por los trabajos de la cantera, que aprovecharon una capa de arcillolitas cuya base coincide con una superficie límite de orden 7 (numero encerrado en círculo). .... 56
- Figura 33. Detalle de la Figura 27 extremo occidental de la cantera El Vinculo. Aquí se observa una suave discordancia entre depósitos de gravas de canales fluviales y depósitos mas finos originados en llanuras de inundación. La superficie límite es de orden 7 o mayor. .... 57
- Figura 34. Arriba fotografía del retrocabalgamiento Sonso. Abajo esquema interpretativo de la estructura. Resalta la discordancia angular entre las capas de la Formación La Paila (Tp) inclinadas suavemente hacia el oeste y los depósitos cuaternarios suprayacentes (Qs). El estereograma corresponde al dato 22 en la Figura 26. Para la escala utilice las huellas de vehículos. .... 58
- Figura 35. Modelos de elevación digital del terreno del sector Sonso-Amaime realizados a partir de datos de STRM. Se resaltan los escarpes que componen la rampa lateral del sistema cabalgante frontal. Escarpes Quebrada Honda y La Novillera. Arriba el relieve está exagerado 5 veces y abajo 10 veces. .... 60
- Figura 36. Mapa topográfico con la localización de las trincheras de Woodward-Clyde y de los escarpes La Novillera, Quebrada Honda, Venecia y Potrerillo. .... 61

Figura 37. Trinchera Venecia. El registro fue tomado, modificado y reinterpretado de Woodard Clyde (1983). Estos autores identificaron el paleosuelo (2) y el suelo actual (s) plegados, con una edad 14C 6.320 años y 2000 años respectivamente. El suelo actual tendría una separación vertical de 1 m con relación a la base del escarpe mas bajo. El plegamiento fue generado por dos fallas inversas de vergencia oeste. El desplazamiento medido sobre el buzamiento de la falla, sería de 2 m. ....	62
Figura 38. Trinchera Piedechinche. Modificada de WCC (1983). Falla inversa de vergencia oeste. ....	63
Figura 39. Principales superficies geomorfológicas y estructurales del sector Bugalagrande - Tuluá. Trazadas sobre un modelo de sombras realizado a partir de curvas cada 25m. En la zona de colinas bajas, SL representa la superficie inclinada La Llanada. AA´ es la sección presentada en la Figura 40. ....	65
Figura 40. Corte AA´ en dirección N80W del valle del río Cauca y la Cordillera Central que pasa entre Bugalagrande en el norte y Tuluá en el Sur. Resalta el anticlinal en la superficie de aplanamiento; en líneas punteadas se representa la superficie original del terreno. Relacionadas con el núcleo de este anticlinal se encuentran las terrazas documentadas en el río Bugalagrande. Notese el desarrollo de cuencas piggy-back donde se depositan los sedimentos del Cuaternario que se desprenden del frente montañoso principal. El despegue de las fallas de vergencia oeste se presume a partir de una estructura que controla el frente montañoso principal. Perfil topográfico realizado a partir de curvas de nivel cada 25 m del plano digital de la CVC. Ver Figura 39 para la localización del corte. ....	66
Figura 41. Arriba, esquema simplificado del escarpe de flexura del piedemonte occidental de la Cordillera Central en proceso actual de erosión, representado en el flanco oeste del Anticlinal de Andalucía (no a escala). Se sugiere que el plegamiento de los depósitos cuaternarios (Qs) ha ocurrido por la emergencia de fallas aprovechando los planos de estratificación de las unidades infrayacentes (Tp). Abajo, fotografía y esquema del eje del Anticlinal de Andalucía visto desde el Sur. ....	69
Figura 42 Esquema que muestra la relación entre el sistema compresivo NNE y el sistema ENE transpresivo dextral. Tuluá se encuentra en un relevo compresivo izquierdo del sistema ENE dextral que corresponde a la cizalla principal generada por un esfuerzo principal dirigido ENE. El sistema transcurrente NNE se comporta como un sistema riedel dextral a lo largo del cual se generan zonas de hundimiento como en San Marcos y de levantamiento como en Cali. ....	71
Figura 43. En la imagen sobresale el Piedemonte oriental de la Cordillera Occidental controlado por una falla con trazo muy recto en sentido NNE. El control estructural de este rasgo se obtuvo en la Variante San Marcos Figura 48. Modelo de elevación del terreno realizado a partir de datos del STRM. ....	74
Figura 44. Mosaicos fotográficos y esquemas interpretativos del corte de la carretera Cartago-Ansermanuevo en cercanías del puente sobre el río Cauca. El mosaico	

inferior fue invertido digitalmente para compararlo con el mosaico superior, tomado en el flanco opuesto de la carretera, visto en su posición normal. Un graben amplio y un horst angosto se pueden seguir en los dos flancos. los números señalan sitios de medición estructural, las letras representan niveles de la secuencia estratigráfica (A: mas antiguo, F: mas reciente). Las fotografías fueron proporcionadas por Mario Moreno-Sánchez y la interpretación se basa en Pardo-Trujillo et al. (1994). Redibujado para este trabajo. .... 75

Figura 45. Ejemplo de deformación plástica en afloramientos de la carretera Panorama entre Asermanuevo y la Unión. Las arenitas conglomeráticas (Ac) son el sustrato rígido sobre el que depósitos más finos sufrieron licuación (Lc) y a su vez los que se hallan sobre estos se fallaron. .... 76

Figura 46. Arriba, fotografía de un afloramiento característico de la Formación Zarzal sobre la carretera Cartago-Ansermanuevo. Una falla normal afecta estos depósitos. Abajo, esquema interpretativo de la inversión de relieve de las gravas (Cg) que suprayacen la Formación Zarzal (Tpz). .... 77

Figura 47. Trinchera Loboguerrero. Redibujada de Woodward-Clyde (1983). Flor negativa donde la falla principal en el centro de la trinchera, es de rumbo. Fallas en proyección equiangular. Los números dentro de las proyecciones equianguulares corresponden a los consecutivos de fallas. .... 78

Figura 48. Arriba, mosaico fotográfico de las rocas expuestas (basaltos) en el flanco este de la Variante San Marcos, en la carretera que conduce de Yumbo a Media Canoa, en el piedemonte oriental de la Cordillera Occidental. Arriba del vehículo existe una cuña coluvial que se relaciona al fallamiento. Abajo izquierda, detalle de estrías de rumbo sobre una de las fallas vistas en el afloramiento. Abajo derecha, esquema de la Variante con las proyecciones estereográficas de las fallas existentes a lo largo de este corte. .... 79

Figura 49. Abanico fósil de Cali afectado por fallamiento. Fotografía superior, capas de cenizas falladas en el sitio 1 señalado sobre el modelo de sombras. Fotografía inferior, flujo de detritos fallado en el sitio 2 señalado sobre el modelo de sombras. En el Corte A-B en sentido N40W se resaltan los depósitos del abanico en discordancia sobre la Formación Volcánica. .... 80

Figura 50. Perfiles topográficos este - oeste del valle del río Cauca a las latitudes de Buga y Cali. El mayor estrangulamiento del valle esta relacionado con la saliente de Buga. El Río Cauca se mantiene en general recostado contra el piedemonte de la Cordillera Occidental. Perfiles realizados a partir de datos del SRTM. .... 82

Figura 51. Perfil topográfico longitudinal (datos del STRM cada 100 metros) de sur a norte del valle del Río Cauca. En él se han separado tres sectores de acuerdo con las variaciones en el gradiente: en el sur y en el norte, las subcuencas de Cali y Cartago con pendiente regional entre 0.00026 y 0.00022 respectivamente; en el centro La Saliente de Buga con marcadas variaciones en el gradiente. Para cada sección ha sido

trazada la curva de regresión, con diferentes puntos de origen (los valores de intercepto son relativos). Punto de inicio (A): 3.4276 Latitud, -76.5323 Longitud; Punto final (B): 4.8667 Latitud, -75.9231 Longitud. n' y n indican el desnivel máximo y mínimo del Río Cauca en el sector de la laguna de Sonso. Abajo vista en planta de la sección dibujada arriba. .... 83

Figura 52. Arriba, gráfica de índice de sinuosidad del Río Cauca entre Cali y Cartago. El máximo de sinuosidad (2.47) se alcanza en el sector de la Saliente de Buga. Los valores promedio de sinuosidad en los sectores de Cali, Saliente de Buga, y Cartago se trazaron con líneas punteadas. Abajo, esquema en planta del Río Cauca con segmentos de 10 km utilizados para el cálculo de sinuosidad. .... 84

Figura 53. Localización de la estructura principal que conforma la zona de compresión Holocena documentada en este estudio en la “Saliente de Buga” entre Bugalagrande y Amaime. El mapa geológico es adaptado y modificado de Ingeominas (1988) y los desplazamientos de fallas son tomados de Woodward-Clyde (1983) y Moreno-Sánchez y Pardo-Trujillo (2002), modificados de Paris et al. (2000), Nivia (2001). La sección geológica se presenta en la Figura 54. Las direcciones principales de esfuerzos se basan en datos de este trabajo. .... 88

Figura 54. Sección geológica compuesta, entre Trujillo al este de la Cordillera Occidental, y el Guamo en el Valle Superior del Magdalena. La geología de superficie en el valle del Cauca y flanco este de la Cordillera Central es basada en Ingeominas (1988) y datos de este trabajo. La geología del Valle del Magdalena es modificada de Butler y Schamel (1988). La estructura de la corteza es basada en el perfil gravimétrico de Meissner et al. (1976) a la latitud de Buenaventura y ajustado para este modelo. La sección se ubica en la Figura 53 ..... 90

Figura 55. Esquema a escala con los resultados paleosísmicos. Las evidencias geomorfológicas, estratigráficas, cinemáticas y las dataciones permiten definir el segmento del frente de cabalgamiento. .... 92

Figura 56. Esquema que muestra la relación entre el sistema compresivo NNE, el sistema ENE transpresivo dextral y el sistema NNE que se comporta como un sistema riedel dextral a lo largo del cual se generan zonas de hundimiento como en San Marcos y de levantamiento como en Cali. .... 93

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Clasificación de rasgos paleosísmicos, expresiones geomorfológicas y estratigráficas (Tomada de McCalpin, 1996). .....	25
Tabla 2. Desplazamientos de fallas datados por radiocarbono (edades reportadas por los laboratorios GEOCHRON) .....	85
Tabla 3. Parámetros de la fuente del frente de cabalgamiento del piedemonte occidental de la Cordillera Central en la Saliente de Buga. ....	97

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1**

**METODOLOGÍA: AMPLIACIÓN DE CONCEPTOS**

### **ANEXO 2**

**EL REGISTRO GEOMORFOLÓGICO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA: DETALLE**

### **ANEXO 3**

**EL REGISTRO ESTRATIGRÁFICO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA EN LOS PIEDEMONTES DE LAS CORDILLERAS CENTRAL Y OCCIDENTAL, VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA : DETALLE**

### **ANEXO 4**

**RELACIONES DE LAS FALLAS CON LOS ESFUERZOS PRINCIPALES: DIEDRO RECTO**

### **ANEXO 5**

**CUANTIFICAR EL TERREMOTO: MAGNITUDES**

## **RESUMEN**

Las expresiones geomorfológicas regionales de deformación tectónica reciente en el valle del Cauca se revelan en el plegamiento de las unidades del Neógeno, en los sistemas de fallas paralelos y transversales a los orógenos, así como en la forma del valle aluvial del río Cauca el cual es estrangulado por una saliente de la Cordillera Central denominada en este trabajo La Saliente de Buga. Los resultados de este estudio muestran que esta saliente corresponde a una zona de compresión Holocena ubicada en la terminación occidental del sistema de fallas ENE, un sistema transpresivo dextral.

Con evidencias geomorfológicas, estratigráficas, cinemáticas y edades  $^{14}\text{C}$  se comprueba que el piedemonte occidental de la Cordillera Central se ha desarrollado como consecuencia del avance progresivo de un sistema de fallas de cabalgamiento de vergencia oeste. Se infiere que estas fallas, en profundidad, se están propagando a través del Cinturón de Cabalgamiento Plegado del Terciario documentado con sismica de reflexión por Alfonso et al. (1994), pero que hacia la cuenca se comporta como una piel delgada y hacia el orógeno como una piel gruesa. A la luz de las nuevas evidencias documentadas en este trabajo, puede concluirse que la estructura activa a nivel regional, en una gran porción del valle del Cauca y de la Cordillera Central se corresponde con la indentación de una cuña continental por debajo del valle del río Cauca (ej. Meissner *et al.* 1973) (Figura 64). Las fallas de vergencia este son retrocabalgamientos que indican que se trata de una cuña subcrítica de Coulomb. Se entiende que cuando existe una cuña subcrítica, la estructura atravesó un período de calma e intensa erosión y los retrocabalgamientos fuera de fase aparecen como resultado del continuo avance tectónico.

El sistema compresivo forma en conjunto un escarpe de flexura con cara hacia el oeste que geomorfológicamente se manifiesta por una serie de escarpes, terrazas, pliegues y cuencas piggy-back que están asociados a la propagación de fallas sintéticas de vergencia oeste y sus antitéticas de vergencia este. La actividad Holocena de este sistema compresivo, así como las evidencias de levantamiento cosísmico se sustentan con: 1) dataciones de paleosuelos relacionados directamente con la emergencia de las fallas de cabalgamiento; 2) evidencias de depositación controlada tectónicamente, como discordancias angulares y paraconforminades; 3) variaciones en la topografía del valle y en el comportamiento del río Cauca dadas por una zona de hundimiento y máxima sinuosidad del río, así como una laguna activa justo en el sitio de máximo empuje en la Saliente de Buga; 4) ruptura de abanicos aluviales recientes; 5) terrazas erosivas generadas por cambios en el nivel base local debidos al crecimiento activo de pliegues.

La cinemática identificada en los diferentes sitios a lo largo del valle indica que hay una compresión dirigida E-W a la latitud de Tuluá y NW-SE en la Saliente de Sonso. Se sugiere que las fallas NW con componente normal identificadas en la cantera El Vínculo y los abombamientos del terreno de dirección NW comprendidos entre Amaime y Sonso podrían estar relacionados por medio de una inversión tectónica. Esto además estaría indicado por la falla inversa documentada en la Trinchera Piedechinche. A nivel regional los lineamientos

NW tienen una expresión conspicua en imágenes de satélite atravesando la Cordillera Central. Estas estructuras al parecer se corresponden con aquellas descritas como fracturas de tensión por Hall y Wood (1985). Se propone que en la fase de deformación actual esas estructuras están siendo reactivadas y más que presentar desplazamientos sinestrales, se comportan como rampas laterales del sistema de cabalgamiento frontal. En muchos sitios éstas estructuras aparecen cubiertas por depósitos cuaternarios y en algunos sectores los cortan. Posiblemente actuaron como un sistema riedel dextral que hoy induce un desplazamiento sinistral aparente del sistema NS.

Los rasgos observados en el flanco oeste del valle del río Cauca indican que éste corresponde a un sistema riedel dextral, en cuyos escalones se forman estructuras de hundimiento como la señalada a la latitud de San Marcos; más adentro en la Cordillera Occidental según lo indica la flor negativa de la Trinchera Loboguerrero; en el norte del valle según lo indica el afloramiento Cartago-Ansermanuevo. Aunque no existen evidencias cronológicas sobre la actividad reciente de este sistema. En Cali, las evidencias muestran deslizamiento de flexura en las unidades del Paleógeno y en una unidad datada en el Cuaternario. Además fallamiento formado en el eje de un pliegue. Se sugiere que esta estructura riedel dextral formó parte de aquellas responsables de la formación del Foso o del Graben Cauca-Patía pero que hoy están en inversión.

En tres escarpes relacionados con el frente de cabalgamiento principal se determinaron edades por radiocarbono de paleosuelos que permitieron obtener intervalos promedio de retorno entre 5000 y 6000 años para terremotos de magnitudes  $M_w > 7$ . Con base en un paleosuelo sobrecorrido en las unidades del Neógeno y sellado por la secuencia cuaternaria se infiere que la reactivación del cinturón de cabalgamiento ocurrió después de 7000 años.

Por último, la compresión Holocena dirigida este-oeste, mas allá de inducir una transpresión activa simple a lo largo de las diferentes trazas activas del sistema de fallas paralelo a las cordilleras (Cauca-Patía, Cauca Almaguer, San Jerónimo, Silvia Pijao y Guabas Pradera) está acortando toda la unidad del piedemonte occidental de la Cordillera Central. Por lo tanto la partición de los esfuerzos no necesariamente actúa sobre el cinturón de deformación, debido a que algunas características tectónicas importantes pueden combinar ambos deslizamientos, inverso y de rumbo, tal como ocurre en el sistema de fallas del borde oriental de la Cordillera Oriental.