

ANÁLISIS MORFOTECTÓNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ A PARTIR DE SENSORES REMOTOS, COLOMBIA-SUR AMÉRICA

Julio Fierro-Morales ^{a,1}, John Alexander Bernal-Rincón ^{a-b,2}

^a Grupo TERRA Cra 19ª No 82-14 Of.202. Bogotá D.C. Colombia – Sur América.

^b Universidad Nacional de Colombia.

¹ juliofierro.morales@gmail.com. Geólogo MSc. Geotecnia.

² jabernalr@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

La Sabana de Bogotá localizada en el centro de Colombia entre 4°30' y 5°15' de latitud norte y 73°45' y 74°30' de longitud oeste la cual morfológicamente representa una altiplanicie situada entre 2550 a 2600 metros sobre el nivel de mar. Corresponde a una gran cuenca tecto-sedimentaria rellena por cientos de metros de sedimentos aluviales y lacustres de edad Plioceno tardío a Pleistoceno (Van der Hammen, 1995). En trabajos realizados por varios autores se ha determinado que la Sabana de Bogotá se encuentra bajo una tectónica de régimen compresivo relacionada con la Orogenia Andina que generó una serie de pliegues estrechos y fallas de cabalgamiento con dirección NNE-SSW que la limitan en sus flancos y que este es el principal rasgo tectónico que actualmente se presenta en la zona. (Montoya & Reyes, 2005)

No obstante con base en trabajos detallados -escalas 1:200 a 1:10.000- de Geología y de Geotecnia realizados en la Sabana de Bogotá se encuentran indicios que la tectónica de la zona no se encuentra únicamente ligada al régimen compresivo antes mencionado sino que rasgos tectónicos fundamentales se encuentran en dirección WNW-ESE, todo esto fundamentado en diferentes herramientas geológicas como son la toma y el análisis de datos estructurales, rasgos geomorfológicos, reinterpretación de mapas, entre otras.

En este marco los sensores remotos, definidos por Lillesand y Kiefer (1994) como la ciencia y arte en la obtención de la información de los objetos sin que medie entre el sensor y ellos un contacto directo, se constituyeron en herramienta para complementar el trabajo de campo permitiendo hacer observaciones a nivel más regional sobre diferentes rasgos tectónicos, geológicos o geomorfológicos. Y siendo la morfotectónica el conjunto de interacciones entre la morfología y la tectónica (Aubouin *et al.* 1980) los sensores remotos se convierten en una importante herramienta a la hora de realizar un análisis morfotectónico. Es por esto que este trabajo pretende realizar una interpretación a partir de los sensores remotos de los rasgos morfotectónicos más notables a nivel regional en la Sabana de Bogotá con el fin de complementar el detallado trabajo de campo realizado durante varios años por el grupo TERRA (Fierro-Morales *et al.* en preparación).

METODOLOGÍA

Dentro de este estudio se utilizaron fotografías aéreas a diferentes escalas (1:3.500 a 1:60.000) y de diferentes épocas (1938 a 2004), imágenes satelitales Landsat y modelos digitales de terreno con diferentes resoluciones. La interpretación de cada una de estas se realizó de manera detallada tomando como referencia principalmente rasgos geomorfológicos que señalaran de manera clara indicios tectónicos como son lineamientos o fallas, entre otros.

El modelo digital de terreno (TDM) utilizado para el análisis fue tomado el 14 de febrero de 1995 (cortesía de Global Land Cover Facility), siendo este el que mostraba la mejor resolución del relieve de la zona de estudio. Para realizar la interpretación el TDM se observó en modo de relieve, ya que de esta manera los rasgos morfoestructurales muestran un buen contraste y definición. Con base en el TDM se trazaron lineamientos a nivel regional basados principalmente en la morfología de la zona, se identificaron rotaciones, curvaturas, truncamientos y desplazamientos de las estructuras y otros elementos regionales que ayudaron a la identificación de lineamientos. (Figura 1). Nótese en esta figura las estructuras NNE que se encuentran cortadas por los lineamientos NW resaltados.

Las imágenes satelitales escogidas para trabajar fueron Landsat TM tomadas el 30 de Agosto de 1997 en formato BSQ apoyadas en imágenes Landsat TM tomadas el 14 de febrero de 1995 en formato Geotiff, (imágenes cortesía de Global land cover Facility), ya que estas fueron las imágenes que mostraron las mejores definiciones, presentar una alta calidad, baja cobertura de nubes en la zona específica trabajada y no presentaban errores radiométricos. El tamaño de escena de cada una de ellas es de 185 x 185 km, al cubrir esta un área mayor que la de estudio se procedió a obtener una ventana de la imagen, de esta manera se obtuvo la imagen final de trabajo (Figura 2). El área de trabajo con base en las orbitas Landsat es de path 8 y row 57.

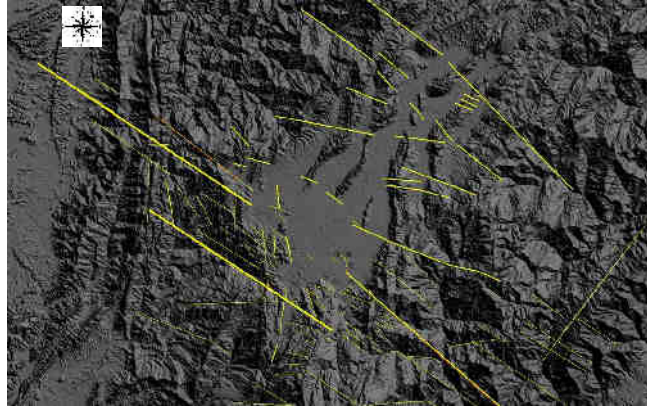


Figura 1. Modelo digital de terreno de la Sabana de Bogotá mostrando los lineamientos transversales principales sin destacar las estructuras andinas NNE-SSW.

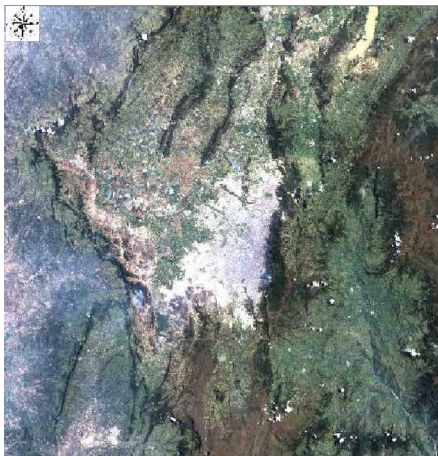


Figura 2. Imagen ID 019-333-TM. (Cortesía Global Land Cover Facility (GLCF) <http://glcf.umiacs.umd.edu>. 3-2-1 (RGB))

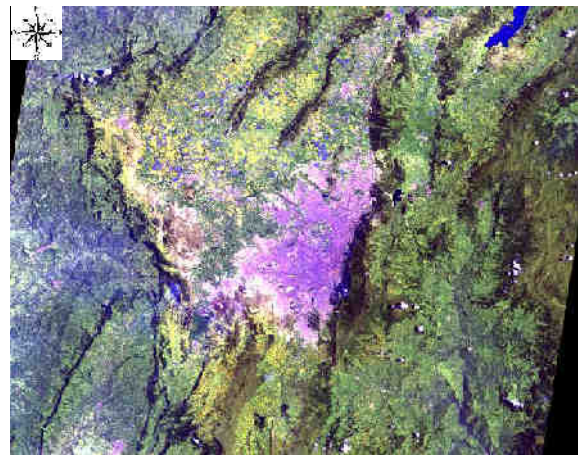


Figura 3. Imagen de trabajo Georeferenciada en Proyección Transverse Mercator – Esferoide WGS 84 – Datum Bogotá, en combinación 7-5-1 (RGB)

Las imágenes fueron procesadas en el software Erdas, los procesamientos realizados fueron la compilación de bandas a un solo archivo imagen con el fin de realizar composiciones en falso color que mostraran una buena resolución, nitidez y contraste de rasgos para la interpretación; luego de probar con 18 combinaciones de bandas diferentes se obtuvo que la combinación 1-4-5 resalta en buen medida la vegetación, la combinación 2-4-5 resalta la infraestructura y se seleccionaron para trabajar las combinaciones a falso color de las bandas 7-5-1 y 5-2-6 filtro RGB (Figura 3) las cuales muestran un buen realce de los cursos de agua y del sustrato rocoso permitiendo la fácil interpretación para el fin requerido. Se realizaron convoluciones espaciales con matrices de 3x3 en las direcciones N-S, E-W, NE-SW (Figura 4) y NW-SE (Figura 5) con el fin de realzar cada uno de los detalles presentes en estas direcciones las cuales son las predominantes del sistema tectónico de la zona de estudio.



Figura 4. Detalle de la imagen aplicando la convolución 3x3 Right diagonal edge detection. 7-5-1 (RGB). Se observan dos rangos predominantes NNE y SW.



Figura 5. Detalle de la imagen aplicando la convolución 3x3 Left diagonal edge detection. 7-5-1 (RGB). Nótese el rango predominante NW, especialmente en la zona suroccidental.

Las fotografías aéreas se escogieron de entre los vuelos existentes en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi tomando en cuenta criterios como la escala la cual debía mostrar con el detalle y la definición necesaria los rasgos geomorfológicos, Para la Sabana de Bogotá se han interpretado cerca de 100 fotografías aéreas de escalas variables entre muy detalladas (1:3.500) a regionales (1:60.000) en el marco de diferentes estudios de geología para ingeniería y geología ambiental. La interpretación se realiza utilizando como herramienta un estereoscopio de espejos que permite una observación en relieve regional de toda la zona de traslape, a partir de esta se observaron lineamientos y tendencias regionales de disposición estructural de rocas sedimentarias las cuales fueron trazadas para luego interpretarlas a partir de la morfotectónica. Posteriormente se observaron con estereoscopio de bolsillo de 2X y 4X los rasgos más detallados como son los diferentes patrones de cursos de agua, niveles de terrazas en las llanuras lacustres y lineamientos débiles, los cuales fueron trazados y se interpretó su posible influencia tectónica; esto se realizó a cada uno de los pares estereoscópicos analizados. Con el fin de confrontar los resultados de las fotointerpretaciones con los de las imágenes satelitales, las primeras se digitalizaron y se georeferenciaron en los software Erdas y Arc-Gis, sobreponiendo las imágenes ortorectificadas sobre las bases topográficas digitales facilitadas por la Secretaría Distrital del Ambiente de la Alcaldía de Bogotá. Estas imágenes interpretadas fueron insumo fundamental para producir mapas geológicos y geomorfológicos preliminares, los cuales serían ajustados con los datos de GPS tomados en campo. Con las imágenes satelitales y el Modelo digital de terreno se identificaron y trazaron lineamientos regionales con base en criterios morfotectónicos identificables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de lo interpretado tanto en las fotografías aéreas, en las imágenes satelitales y el modelo digital de terreno se obtuvieron resultados muy similares en cada uno de ellos en los cuales se observan como estructuras mayores los cerros que bordean la Sabana de Bogotá en dirección NNE-SSW, se observan también lineamientos en sentido E-W de baja densidad dentro de la zona de estudio, además se tiene una clara tendencia de lineamientos en dirección aproximada N60W de gran densidad que cortan en todos los sectores observados estas estructuras NNE (Figura 6). Estos lineamientos N60W se observan también a partir de la continuación de truncamiento de varios cerros en el sector central de la Sabana de Bogotá. Hacia el sur de la Sabana de Bogotá se observa una gran complejidad estructural que muestra claramente en algunos sitios unos desplazamientos sinestrales de las capas, rotación de los rumbos de las estructuras principales (Sinclinal de Usme y Anticlinal de Cheba) de N-S al sur a NW-SE hacia el norte, fracturamiento intenso de las capas y el control NW a pequeña escala (Figura 7a) y en la misma forma de la Sabana de Bogotá. (Figura 8).

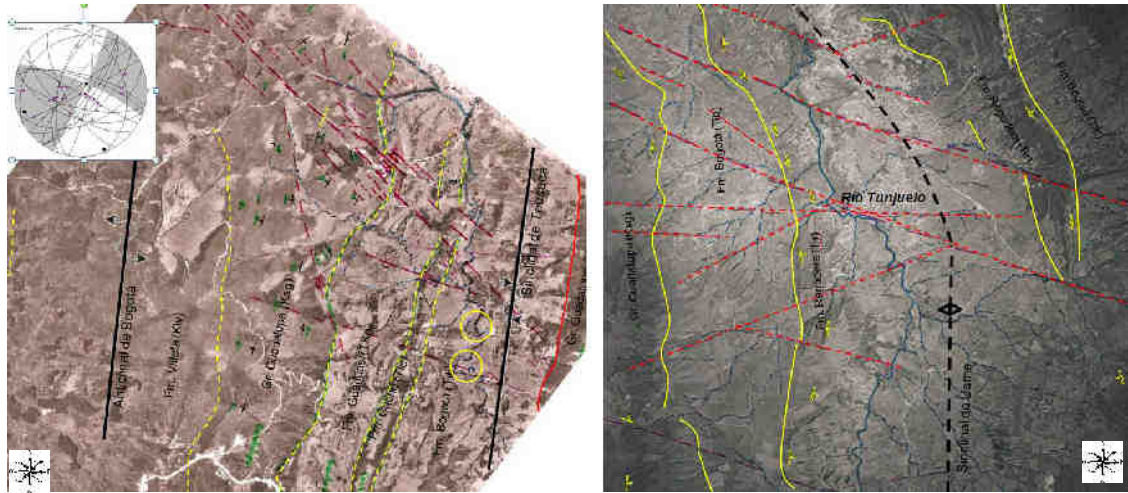


Figura 6. Fotointerpretación de rasgos transversales (en rojo) que dislocan estructuras NNE-SSW y causan la inversión de estratos. A la izquierda la zona del río Teusacá (Sabana Oriente): dentro de los círculos amarillos se detectaron cursos abandonados del río Teusacá; se muestra también la solución tectónico-cinemática a partir de mediciones de campo. A la derecha, la cuenca baja del río Tunjuelo (Sabana sur): control de segmentos del río y desplazamiento de materiales aluviales.

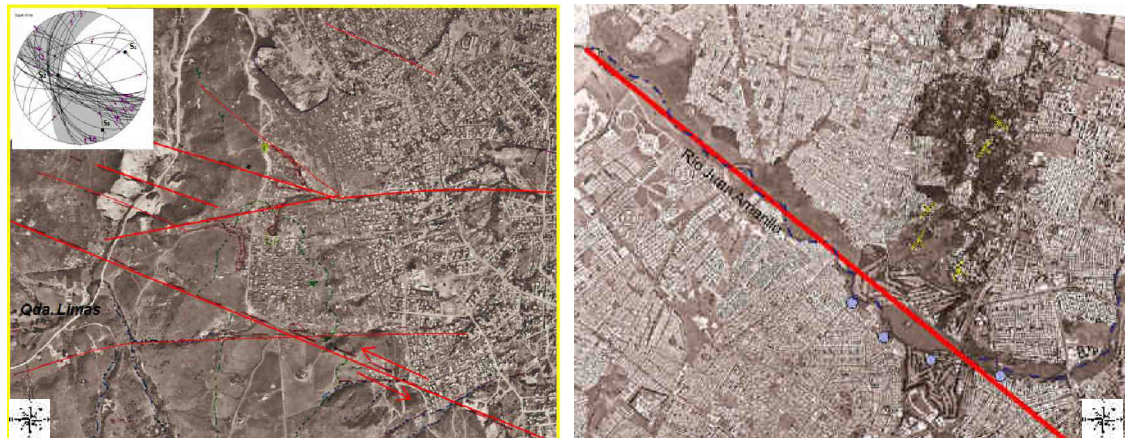


Figura 7. Fotointerpretación de rasgos transversales (en rojo) y sus relaciones con rasgos tectónicos y neotectónicos. A la izquierda la cuenca de la quebrada Limas (Sabana sur): rasgos que controlan drenajes menores y son apreciables en las zonas de canteras; se muestra también la solución tectónico-cinemática a partir de mediciones de campo. A la derecha, río Juan Amarillo (Sabana norte): control del río y de fuentes termales (puntos azules, tomados de Royo & Gómez, 1946).

A partir de las fotografías aéreas se observa que los drenajes de la zona de estudio están entre subdendrítico a subparalelo, se observa claramente el control tectónico que se tiene sobre el cauce de algunos ríos en el sector de llanura dentro de la zona de estudio como son el cauce de los ríos Juan Amarillo (Figura 7b), Fucha y Tunjuelo y algunos segmentos del río Bogotá, el cual es el de mayores caudales en la Sabana; este control se presenta en dirección N60W predominantemente. Dentro de las zonas cordilleranas se aprecian cambios de curso en torrentes de montaña dentro de las áreas donde los lineamientos N60W son evidentes (río Teusacá y río Tunjuelo).

La fotointerpretación de los Cerros Orientales de Bogotá, que es un cordón montañoso que limita la Sabana hacia el oriente y que se constituye en un referente geográfico fundamental en la historia de la capital del país y que fundamentalmente es la expresión de una estructura anticlinal, mostró que las inversiones de los flancos se relacionan con las intersecciones de rasgos transversales, marcados en general por la existencia de valles transversales a los cerros. Las inversiones han sido explicadas mediante mecanismos diversos que incluyen pliegues por propagación de fallas y tectónica

gravitacional, pero el hecho que las inversiones se relacionen con rasgos transversales y que este patrón se repita en escala meso (afloramiento) lleva a reevaluar las teorías existentes.

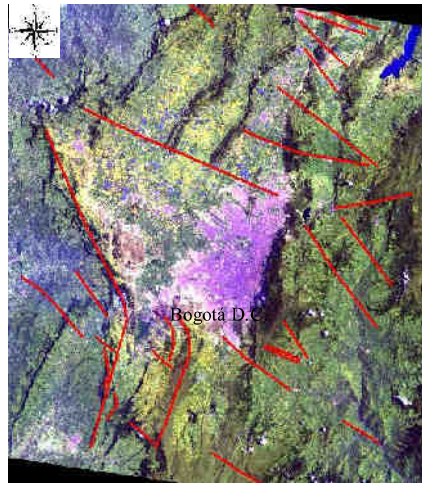


Figura 8. Imagen landsat TM 7-5-1 (RGB) de la zona de trabajo con los principales lineamientos, nótese la rotación de las estructuras principales al sur del área así como los lineamientos NW que cortan las geoformas que se encuentran en sentido NNE.

De los análisis obtenidos con estas herramientas se puede concluir que la tectónica de la Sabana de Bogotá no se encuentra controlada únicamente por regímenes compresivos con sentido E-W que producen estructuras de fallas y pliegues con dirección NNE-SSW y que estos no son los que actualmente controlan la tectónica de la Sabana ya que con la interpretación se pudo determinar que los lineamientos WNW están cortando, dislocando, redireccionando y seccionando en todos los sectores las estructuras NNE, deduciendo así que son las estructuras WNW, con desplazamientos principalmente sinestrales, las que hoy día controlan la tectónica del sector y muestran que los esfuerzos principales no serían únicamente compresivos sino que el aporte del componente oblicuo es de gran importancia. Por otra parte, y teniendo en cuenta que la Laguna de Bogotá se deseca hace aproximadamente 25.000 años, todos los controles de cursos de agua que hoy día discurren por la llanura lacustre serían neotectónicos, lo cual, sumado con fuentes termales coincidentes con las zonas controladas (Figura 7b) permiten postular la actividad reciente de las fallas transversales.

Las anteriores conclusiones son coincidentes con un intenso trabajo de campo que incluye la medición de más de 20.000 datos estructurales, 6% de los cuales corresponde con planos estriados y que han llevado a un grupo de investigadores a una nueva propuesta de sistema estructural para Bogotá (Fierro-Morales et. al. en preparación)

REFERENCIAS CITADAS

- Aubouin, J., Brousse, R., & Lehman, J.P. 1980. Tectónica, Tectonofísica, Morfología. Editorial Omega, Barcelona, p. 642.
- Fierro-Morales, J., Ángel-Amaya, J., Casallas, W., Rayo, L., Blanco, M., Bernal-Rincón, A., Corredor, J., Moya, H., Vásquez, D. & Londoño, C. Deformación frágil, campos de esfuerzos y tectónica activa en la Sabana de Bogotá Colombia - Sur América. En preparación.
- Lillesand, M.T. & Kiefer, W.R. 1994. Remote sensing and image interpretation. University of Wisconsin, 753p.
- Montoya, D.M. & Reyes, G.A. 2005. Geología de la Sabana de Bogotá. Ingeominas. Bogotá.
- Royo y Gómez, J. 1946. Las manantiales termales de Las Pléyades, Municipio de Suba (Cundinamarca). Informe No. 509^a. Ingeominas, Bogotá.
- Van der Hammen, T. 1995. Plioceno y Pleistoceno del Altiplano de Bogotá. Análisis Geográfico No. 24. Publicación Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.