

# **SENSORES REMOTOS APLICADOS AL ANALISIS DE LA EVOLUCION REGIONAL DEL PIEDEMONTTE LLANERO, COLOMBIA**

**Kim ROBERTSON \***

**RESUMEN:** Mediante la interpretación de imágenes de satélite, fotografías aéreas y revisión de campo se ha adelantado un estudio de la evolución geomorfológica del Piedemonte Llanero entre el río Ariari al sur y el río Casanare al norte. El análisis regional se basó en los patrones de drenaje, dinámica fluvial activa, presencia y morfología de paleocauces y lineamientos de posible origen tectónico. Varias técnicas de procesamiento digital fueron empleados sobre imágenes Landsat TM para el realce de los patrones de drenaje, la dinámica fluvial y los lineamientos.

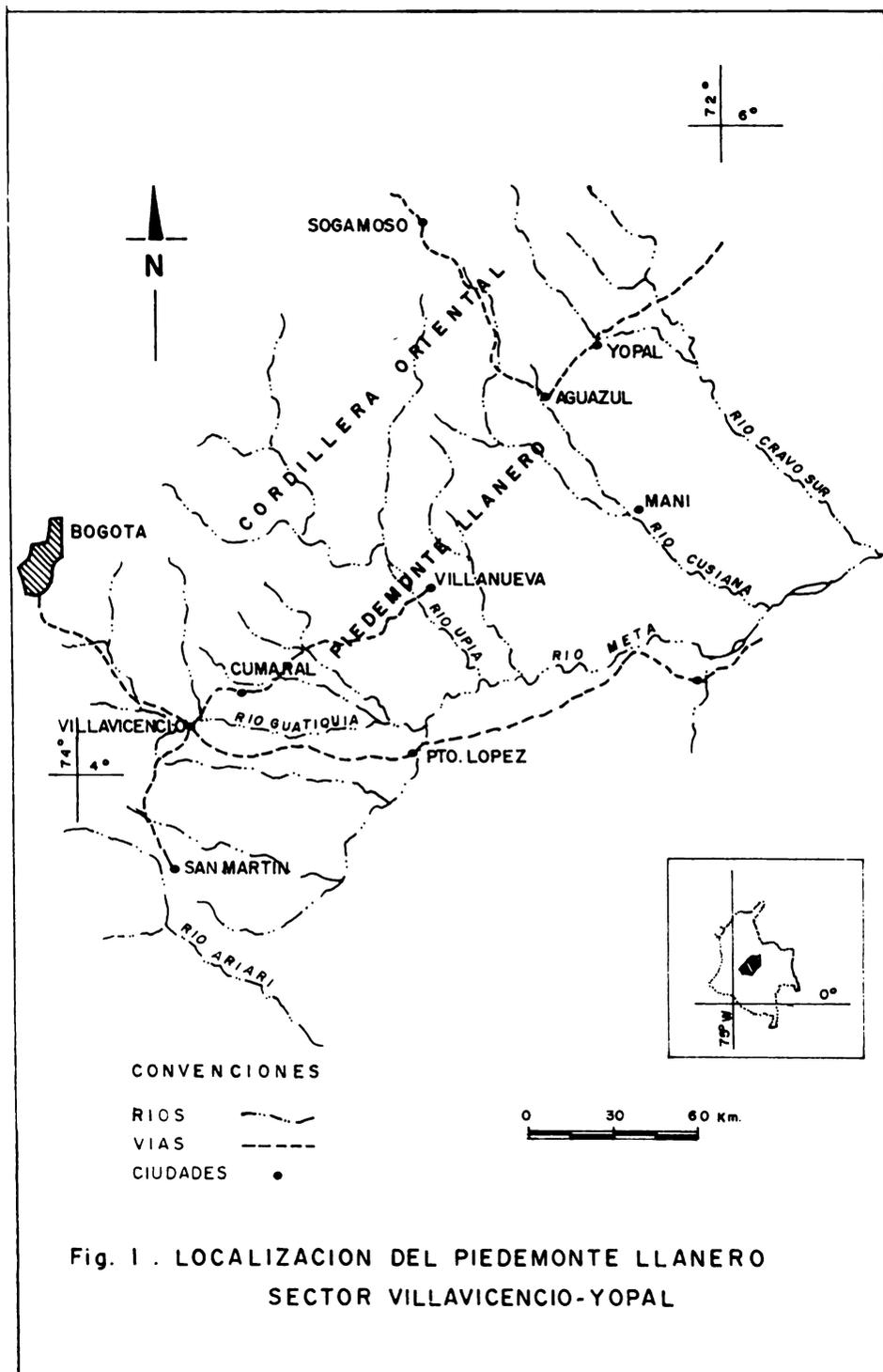
Los resultados iniciales señalan una historia compleja con drenaje distributivo asociado a numerosos abanicos aluviales en distintos grados de desarrollo, algunos como los de Yopal y Upía de hasta 35 km de radio. También se pudo identificar algunos casos de captura fluvial antigua como el río Ariari por el río Guaviare. El análisis de lineamiento y evolución fluvial señala varios casos con influencia neotectónica, con la deformación activa de varios cauces incluyendo los ríos Guacavía, Upía y Cusiana. **Palabras Claves:** sensores remotos, imágenes de satélite, drenaje, dinámica fluvial, lineamientos, neotectónica y paleoclimas.

## **1. Introducción**

La visión sinóptica de las imágenes de satélite puede proporcionar nuevos criterios regionales sobre los procesos morfodinámicos en varias zonas del país. Este artículo pretende exponer algunas de las técnicas posibles en este campo de las ciencias naturales y resultados obtenidos empleando imágenes Landsat sobre la región del Piedemonte Llanero de Colombia. Como objeto específico, se busca identificar la influencia neotectónica y paleoclimática en la evolución de los sistemas fluviales recientes y la morfodinámica de la región. El análisis por medio de sensores remotos se complementa con las técnicas de fotointerpretación de fotografías aéreas y las observaciones de campo de tipo regional y puntual.

---

\* Ing. Geógrafo, M.Sc., Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).



Estos aspectos de investigaciones son adelantados por el autor dentro del Proyecto Geodinámica de Colombia de la Subdirección de Geografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Bogotá.

Estudios regionales sobre la zona de los Llanos Orientales ya habían señalado indicios de deformación neotectónica, especialmente en el Piedemonte Llanero (Goosen, 1971; Page, 1986). Más recientemente Robertson (1989) precisó alguno de los patrones de deformación neotectónica en la región de Restrepo - Cumaral, Meta y Cusiana en el Casanare. Adicionalmente Forero (1977) y Khobzi (1981) identificaron patrones eólicos relacionados con campos de dunas a partir de la interpretación de imágenes de satélite y postularon paleoclimas más secos durante el Pleistoceno para su génesis.

El presente trabajo se adelantó con imágenes Landsat TM, tomadas el 11 de Enero de 1988, de alta calidad y baja cobertura de nubes apoyadas por imágenes Landsat MSS del año 1973. El área de estudio abarca una franja desde el río Ariari al Sur hasta el río Casanare al Norte aproximadamente entre Lat. 3°30' Long. N, 74° W y Lat. 6° N, Long. 71°30' W (Fig. 1).

Las imágenes fueron procesadas inicialmente en los laboratorios del ITC de Holanda empleando el sistema ILWIS. El procesamiento incluyó un "stretch lineal" del histograma y filtros de realce de bordes (Sabin, 1987). También se ensayaron la "igualización del histograma", "band ratioing" y "componentes principales" con resultados inferiores al tratamiento convencional en esta zona del trópico húmedo. Se hicieron varios intentos de realce direccional de lineamientos con resultados pobres dada la poca variación de relieve y la gran incidencia humana a través de los cultivos.

Con base en estos procesamientos, se ensayaron varias combinaciones de bandas empleando las con mayor resolución y nitidez, las bandas 3, 4, 5, y 7. Después de varios ensayos se seleccionó la combinación a falso color de las bandas 3, 4 y 5 (RGB) por el realce de drenaje y buen contraste para la interpretación.

## **2. Criterios y técnicas de interpretación**

Para las interpretaciones regionales de las zonas aluviales, los patrones de drenaje y el régimen fluvial constituyen los elementos

fotointerpretables más importantes sobre las imágenes de satélite (Baker, 1986). Los patrones de drenaje en zonas aluviales registran variaciones pequeñas en la pendiente regional además de la permeabilidad local. Condiciones de drenaje y orientaciones preferenciales pueden resaltar paleocauces y meandros abandonados, los cuales contribuyen a la interpretación histórica del paisaje. La morfología de los cauces también puede dar pistas sobre condiciones hidráulicas, carga de sedimentos y los regímenes fluviales (Schumm, 1977).

Adicionalmente el análisis de lineamientos regionales, identificables a partir de las imágenes de satélite, puede contribuir a una comprensión de la evolución de los sistemas fluviales. Como la dinámica fluvial y el drenaje son sensibles a cambios leves en la pendiente (Schumm, 1986), la correlación de estos tres elementos fotointerpretables puede dar indicios sobre la evolución reciente en la llanura aluvial y en especial el Piedemonte Llanero.

La interpretación regional a partir de imágenes de satélite también tiene limitaciones que se evaluarán en este artículo. De entrada se puede mencionar que las imágenes Landsat no poseen visión estereoscópica salvo en franjas muy estrechas en los traslapes laterales entre fajas. Las imágenes SPOT tienen esta capacidad mientras las imágenes de Radar presentan un pseudo-relieve pero tienen otros inconvenientes y no serán tratadas en este trabajo.

Los patrones de drenaje más característicos de las regiones aluviales típicos resultan ser el distributivo, dendrítico y multibasín (Chorley, et al, 1984). El patrón distributivo se relaciona comúnmente con los abanicos del piedemonte mientras el patrón multibasín se asocia con las zonas más planas y mal drenadas de los llanos. El patrón distributivo presenta una forma semi-radial a partir de un vértice, generalmente relacionado con la desembocadura de un río principalmente proveniente de la Cordillera Oriental sobre el Piedemonte Llanero. El carácter distributivo resulta de la divagación radial del río principal sobre los abanicos, relictos de los paleocauces y la incisión posterior del drenaje superficial. El patrón multibasín se caracteriza por la falta de un drenaje organizado con pequeñas lagunas y pantanos. Asociado a este drenaje irregular se aprecian paleocauces con sus diques aluviales, los cuales pueden dificultar u obstruir el drenaje local. Estos cauces abandonados generalmente presentan una morfología sinuosa, relacionada con una dinámica meándrica desactivada.

También se observan sobre las imágenes patrones dendríticos de drenaje en la zona distal del Piedemonte Llanero, generalmente asociados con la recolección de la escorrentía superficial en sedimentos homogéneos. Su presencia sugiere condiciones de pendiente y disección de una topografía ligeramente más elevada que el nivel de base local de los ríos aledaños.

En forma complementaria se pudo distinguir dos tipos básicos de dinámica fluvial: trezado y meándrico. Los ríos trezados aparecen próximos a la cordillera y se relacionan con el drenaje distributivo de los abanicos. Este patrón es característico de los ríos con mayor pendiente y carga de sedimentos. Llano adentro estos mismos ríos se transforman en ríos meándricos, típicamente con pendiente menor y carga de sedimentos más fina (Schumm, 1977). Aunque este tipo de metamorfosis fluvial podría señalar algún tipo de control estructural, también corresponde a cambios normales dentro de la dinámica fluvial a medida que las condiciones hidráulicas cambian.

Adicionalmente se identificaron lineamientos tanto en las imágenes Landsat TM como MSS con posibles implicaciones estructurales y actividad neotectónica. La comparación preliminar de las interpretaciones de los dos tipos de imágenes produjo resultados muy dispares, lo cual confirma la dificultad de identificar lineamientos en zonas aluviales sobre imágenes de satélite. Posibles fuentes de discrepancia parecen ser la variabilidad en el uso de la tierra en años diferentes. Sin embargo los lineamientos más pronunciados generalmente coincidieron y fueron incorporados en el análisis regional.

Dentro del análisis regional se detectaron ciertas anomalías en los patrones de drenaje y dinámica fluvial asociados con lineamientos regionales tales como drenaje obturado, invertido y confinamiento aluvial. El drenaje obturado resulta de un bloque de la red de drenaje generalmente por un río principal, el resultante represamiento y la formación de lagunas. Este fenómeno puede relacionarse con un aumento en la carga de sedimentos del río principal o variaciones en el nivel de base, ambas posibilidades de posible origen tectónicas o climático. El drenaje invertido se refiere a un drenaje que corre contra la pendiente regional, un indicador importante de basculamiento y actividad neotectónica (Robertson, 1989). Esta situación es solo aplicable en zonas aluviales ya que en las regiones accidentadas las laderas estructurales y el control geológico inciden para generar otros patrones de drenaje.

Los cauces con posible confinamiento aluvial presentan restricciones de paso dentro de sus propios depósitos aluviales. Como este tipo de depósito constituye la antigua carga de sedimentos del río, el confinamiento del cauce implica un posible cambio de pendiente de origen tectónico que generalmente es acompañado por cambios locales en la dinámica del cauce (Schumm, 1986).

### **3. Resultados regionales**

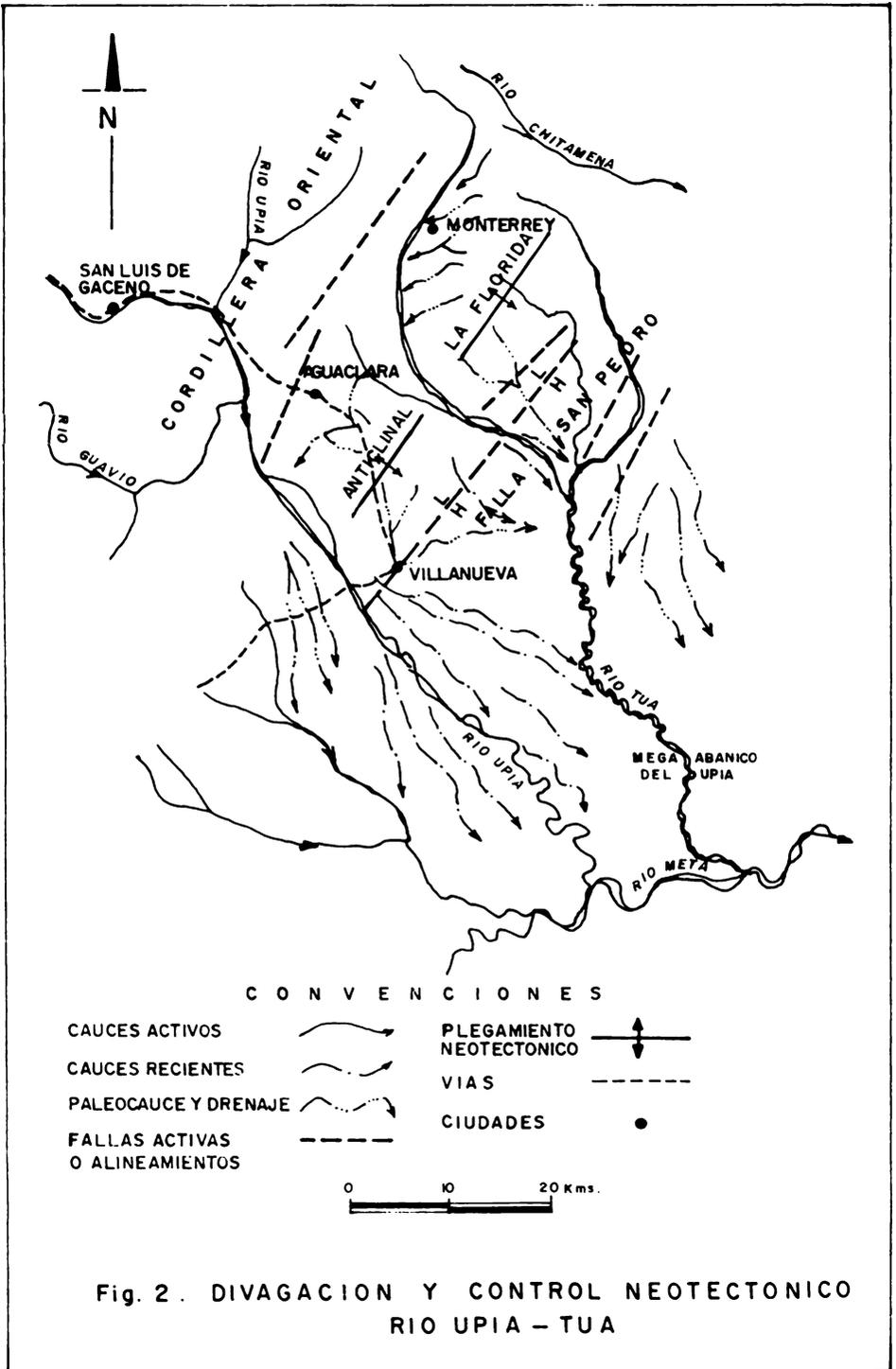
El análisis regional de las características fotointerpretables de imágenes de satélite tales como patrones de drenaje, dinámica fluvial y lineamientos permitió identificar mega-abanicos en el Piedemonte Llanero, terrazas basculadas y plegadas y sistemas fluviales controlados por actividad neotectónica, paleoclimas y la interacción compleja de los anteriores procesos.

#### **3.1. Drenaje, dinámica fluvial y deformación reciente**

A nivel regional se destacan varias zonas en donde los patrones de drenaje, dinámica fluvial, lineamientos y anomalías fluviales indica una actividad neotectónica importante. En la zona de Villanueva, Casanare, se observa un drenaje distributivo de gran magnitud, el mega-abanico del río Upía con más de 50 km. de radio (Fig. 2). Sin embargo este no se desarrolla a partir de las estribaciones de la cordillera sino de los niveles altos de terrazas próximos a la población de Villanueva, Casanare. Esta anomalía coincide con un confinamiento notorio del río Upía a la altura de Villanueva, visible también en la imagen Landsat de 1974 y las fotografías aéreas de los años 60. Esta anomalía fluvial coincide con un lineamiento principal de rumbo noreste, la Falla de San Pedro de actividad cuaternaria (Robertson, 1989).

En las imágenes Landsat también se aprecia claramente un drenaje divergente sobre las terrazas altas de Villanueva correspondientes a la Mesa de San Pedro. El patrón de drenaje es subparalelo con una orientación preferencial hacia la Cordillera Oriental y el Filo de Guaicaramo desde la parte central de la mesa, un claro indicio de basculamiento tectónico hacia el occidente.

Próximo a Monterrey, Casanare, el drenaje sobre el nivel de terrazas altas también aparece invertido hacia el NW mientras el río Túa presenta una desviación larga hacia el sur alrededor de la zona basculada (Fig. 2).



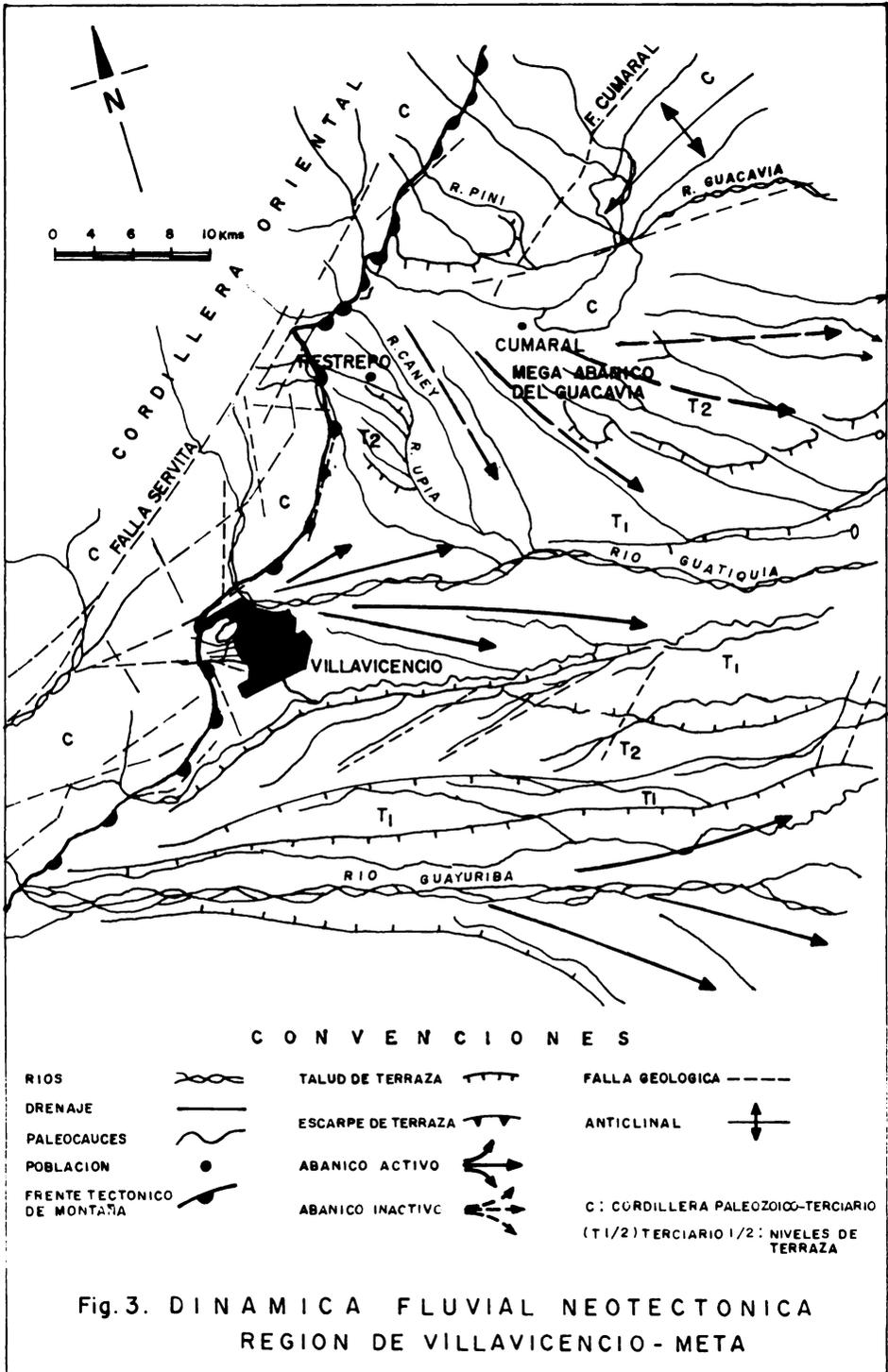
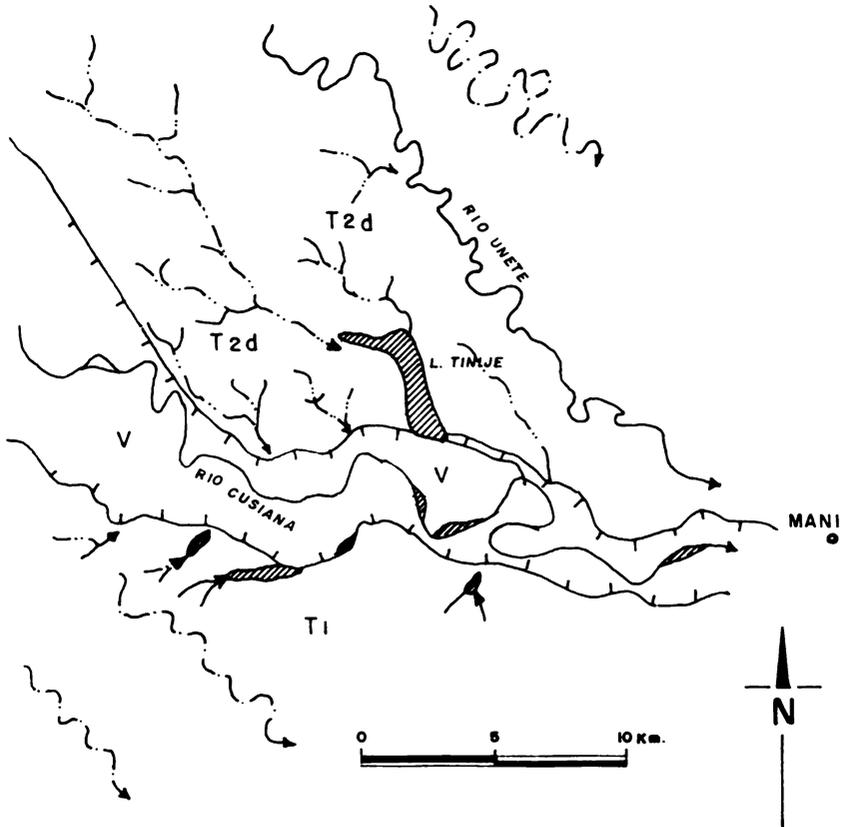


Fig. 3. DINAMICA FLUVIAL NEOTECTONICA REGION DE VILLAVICIENCIO - META



C O N V E N C I O N E S

- |                            |  |   |
|----------------------------|--|---|
| CAUCES ACTIVOS             |  | V - VEGA DE VEGETACION                  |
| PALEOCAUCES                |  | T <sub>1</sub> - TERRAZA POCO DISECTADA |
| DRENAJE / DISECCION        |  | T <sub>2d</sub> - TERRAZA DISECTADA     |
| TALUD DE TERRAZA           |  |   |
| DRENAJE OBTURADO Y LAGUNAS |  |   |

Fig. 4. DISECCION Y OBTURACION DE LLANURA ALUVIAL  
MANI, RIO CUSIANA

Este conjunto de indicios sugiere el levantamiento tectónico y basculamiento reciente de la región entre Villanueva y Monterrey, estructura correspondiente al Anticlinal de La Florida, descrito por Ulloa y Rodríguez (1981) e indicaría deformación continuada en el Cuaternario Superior.

Más al sur, en la zona de Restrepo-Cumaral, Meta, se aprecian indicios de una deformación reciente a partir de los patrones de drenaje y la red fluvial (Fig. 3). En esta zona se presenta un patrón distributivo, característico de un gran abanico aluvial asociado al río Guacavía. La parte central del abanico presenta un drenaje profundizado en su zona media mientras los ríos Upín y Caney son desviados hacia el Sur. Sin embargo, el río actualmente atraviesa las colinas bajas del extremo sur de la Serranía de Las Palomas. Como anomalía, el río Guacavía corre en forma diagonal para atravesar la serranía, orientación probablemente controlada por una falla de rumbo.

Adicionalmente afluentes menores tales como el río Pirí han sido desviados hacia el sur en épocas recientes por el bloque de la serranía de Las Palomas. Estas anomalías coinciden con un lineamiento, la falla de Cumaral y las terrazas levantadas al norte de Cumaral (Fig. 3) (Robertson, 1989). Estas observaciones sugieren que el anticlinal de Las Palomas continúa levantándose y su efecto se extiende hacia el sur deformando el antiguo abanico del río Guacavía.

### **3.2. Posible influencia paleoclimática**

Aunque el Piedemonte Llanero presenta fuertes indicios de actividad neotectónica, llano adentro el paisaje parece más controlado por variaciones de nivel de base o aportes de sedimentos por los sistemas fluviales. Próximo a Maní, Casanare se presentan varias zonas mal drenadas, la más grande conocida como la Laguna de Tinaje (Fig. 4). La morfología de esta laguna coincide con un valle tributario inundado del río Cusiana. Observaciones detalladas sobre las imágenes Landsat indican el cierre del valle tributario por sedimentos aluviales proveniente del río principal, el Cusiana, proceso que "obturó" el drenaje local creando condiciones mal drenadas y la laguna.

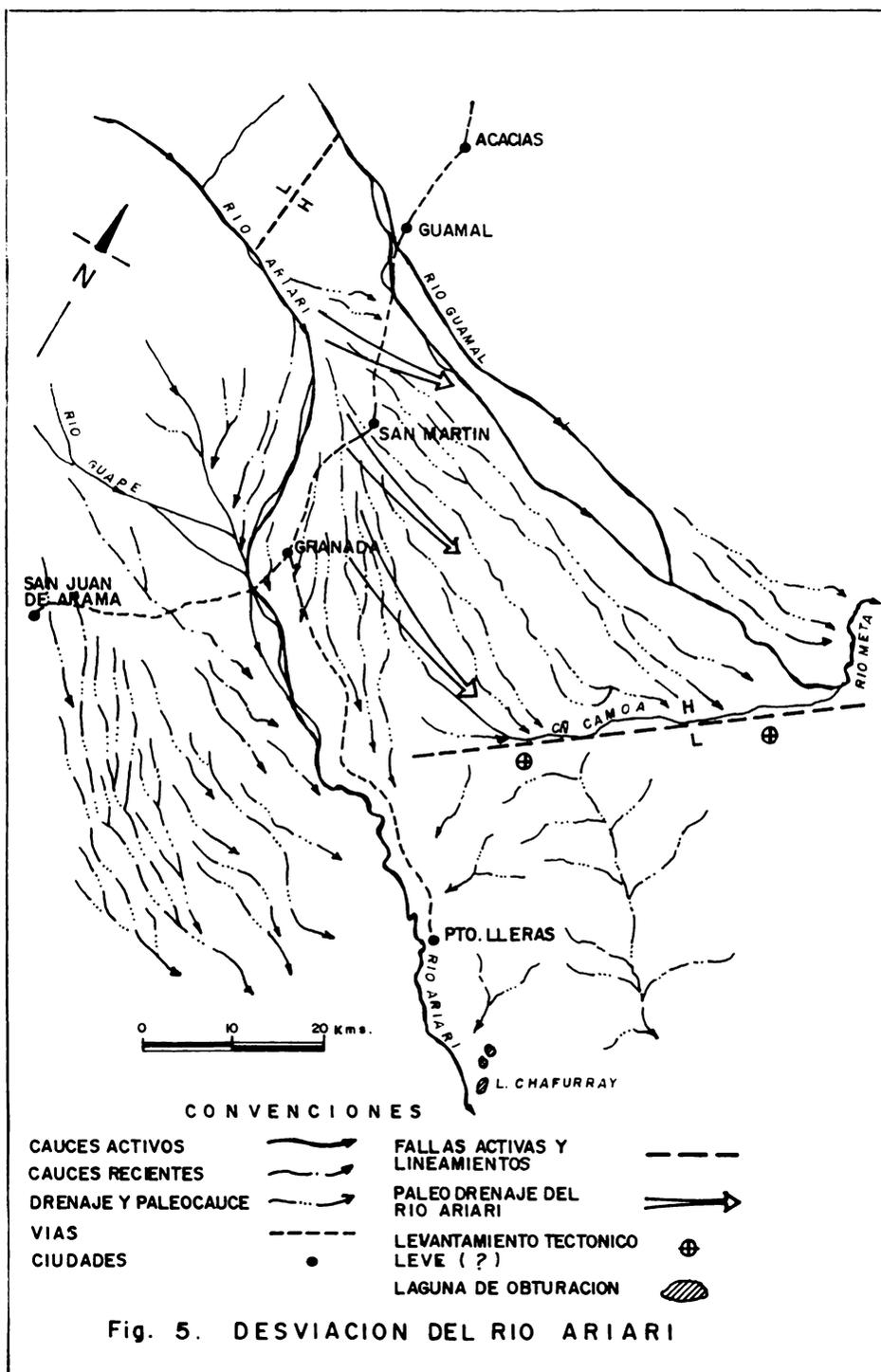
Ese fenómeno de obturación o represamiento aluvial no es aislado ya que pueden apreciarse varios casos en otros ríos mayores de los Llanos y ciertos sectores de la Amazonia. Su significado se relaciona bien sea

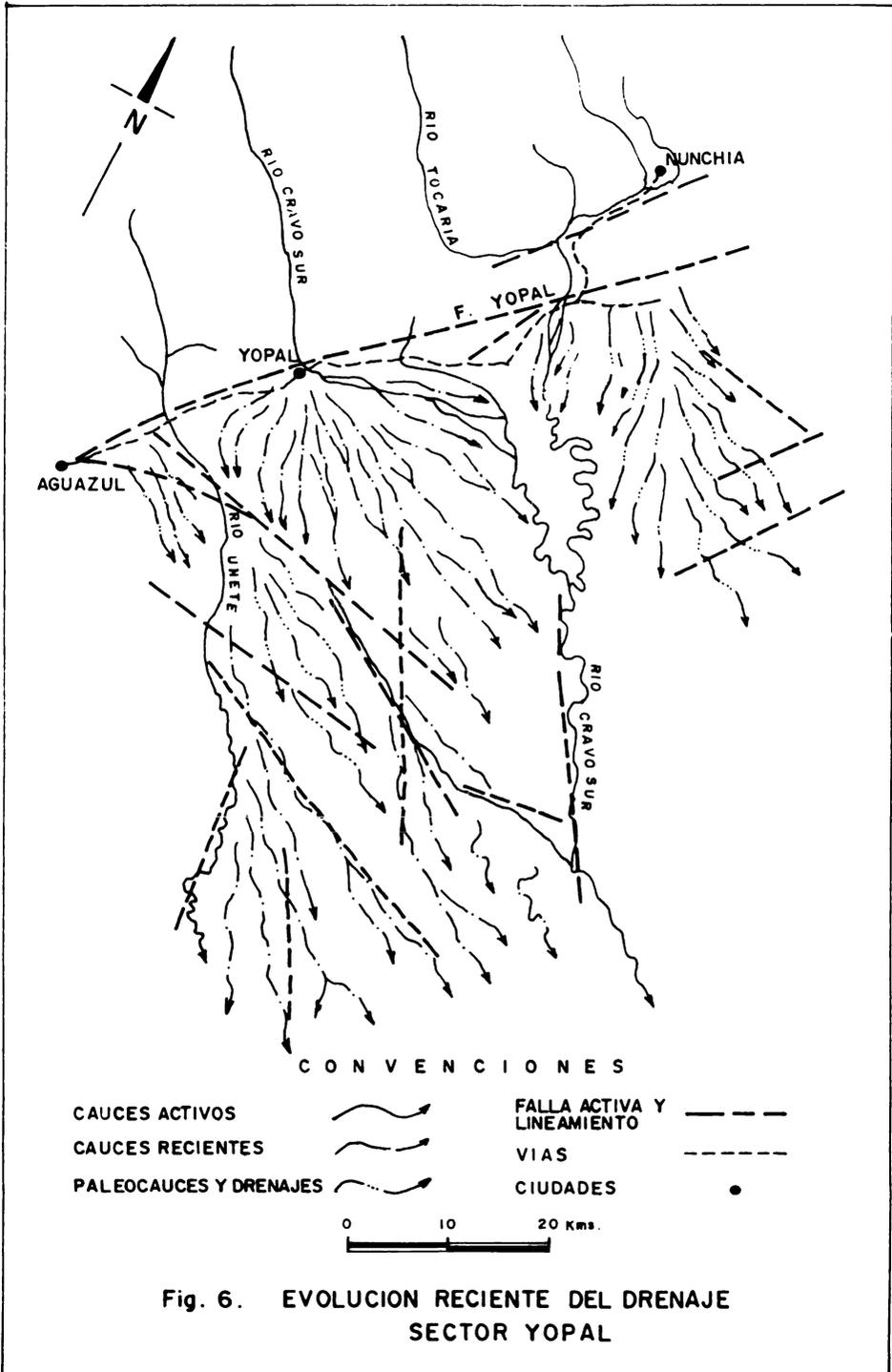
con un cambio local de nivel de base o un aumento a la carga de sedimentos de los ríos principales. Dataciones en lagunas obturadas de los ríos Ariari y Meta en el departamento del Meta indican una edad alrededor de 5000 A. P. (Wijmstra y van der Hammen, 1966), fecha que corresponde aproximadamente al equilibrio eustático marino del Holoceno (Fig. 5). Sin embargo, la gran distancia a la línea de costa y la presencia de algunos raudales, especialmente en el sistema del Guaviare excluyen la posible influencia de variaciones del nivel de mar en la evolución reciente de estos cauces.

El análisis de las imágenes de satélite en el sector del Ariari también indica modificaciones grandes en la red de drenaje y los sistemas fluviales (Fig. 5). Entre los ríos Guamal y Ariari se aprecia un drenaje distributivo amplio con eje a partir de la desembocadura del río sobre el Piedemonte Llanero. Algunos de estos drenajes aparecen más nítidos y su presencia sugiere cauces abandonados que se dirigen hacia el río Guamal y la cuenca del Meta. En esta región, lineamientos principales que limitan cambios abruptos en los patrones de drenaje indican movimientos tectónicos de bloques muy grandes (Fig. 5). El lineamiento mayor de 50 km. lo constituye el Caño Camoa con el bloque levantado hacia sur, lo cual parece haber facilitado el aporte del río Ariari al sistema del Meta. Lineamientos más cortos bordean la cordillera e indican otra zona tectónicamente inestable.

Un incremento en la carga de sedimentos también pudo haber inducido la colmatación lenta de los cauces. Deformación tectónica también ha sido citada como una posible causa aunque parece difícil explicar su aplicación homogénea sobre un área tan extensa. Una posible renovación general del levantamiento de la cordillera, sin embargo, podría potencialmente incrementar los aportes de sedimentos e inducir una colmatación generalizada al sistema fluvial de los Llanos.

La presencia de campos de dunas sobre los Llanos Orientales tanto en Colombia como Venezuela, señala cambios climáticos a gran escala (Khobzi, 1981, Forero, 1977), capaces de influenciar el régimen fluvial de las cuencas altas y generar variaciones en los caudales y potencialmente aportes de sedimentos. Sin embargo, los cambios climáticos fuertes pertenecen al Cuaternario Superior mientras la formación de las lagunas parecen ser de origen muy reciente durante períodos mucho más estables del Holoceno.





### **3.3. Control complejo**

Otro caso, el mega-abanico de Yopal, producto del río Cravo Sur, presenta un drenaje distributivo nítido y poco disectado, indicio de una génesis reciente. Este abanico sobresale por su gran extensión alcanzando un radio aproximado de 30 km sin anomalías asociadas con deformación (Fig. 6). En cambio el río Tocarfa 40 km más al Norte se caracteriza por un drenaje distributivo muy reducido y desconectado al actual sistema fluvial trenzado. Estas características sugieren una evolución distinta de las dos cuencas a pesar de ser sistemas fluviales similares en área y litología (Renzoni, 1991). Una revisión del área de influencia de la alta cordillera indica, sin embargo, que la cuenca del Cravo Sur posee una zona glacial potencial mayor que de la cuenca vecina, lo cual indudablemente incidió en mayores aportes fluvio-glaciales durante la última glaciación.

También sobre las imágenes Landsat se aprecian anomalías locales del drenaje entre los dos ríos, asociadas a las rocas plegadas del Plioceno (Renzoni, 1991), procesos que pueden haber incidido en la incisión del abanico del Tocarfa. Este hecho junto con el carácter lineal de frente de montaña desde Aguazul hacia el norte, sugiere la concentración de la actividad neotectónica a lo largo de este frente montañoso (Fig. 6).

Observaciones de campo confirman suelos y sedimentos fluvio-torrenciales recientes sobre el 80% del Abanico de Yopal. Sobre las imágenes de satélite se aprecian acumulaciones de ladera sobre la margen izquierda del río Cravo Sur en la zona de El Morro y Labranzagrande. Aportes similares en la cuenca del Tocarfa ocurren pero la presencia de un valle transversal con numerosas terrazas (Renzoni, 1991) puede haber amortiguado el impacto sobre el piedemonte. Estos hechos sugieren un mecanismo catastrófico de deslizamientos masivos y represamientos fluviales tal vez relacionados con actividad sísmica del Piedemonte Llanero.

## **4. Conclusiones**

La evolución reciente de los sistemas fluviales y del drenaje del Piedemonte Llanero aparece fuertemente influenciada por deformaciones neotectónicas y en menor grado variaciones climáticas. Los indicios de actividad neotectónica, incluyendo lineamientos de falla, terrazas basculadas y plegamientos de depósito cuaternario sobre el piedemonte,

### *Los sensores remotos aplicados...*

se encuentran concentrados sobre el borde de la cordillera. Aunque se registran algunas deformaciones leves en las fallas antiguas que afectan el Cretácico y el Terciario, los mayores grados de deformación ocurren sobre fallas recientes más al oriente que afectan al Cuaternario y Terciario Superior.

La deformación reciente del Piedemonte Llanero ha incrementado el gradiente de los cauces y la carga de sedimentos a los sistemas fluviales, procesos que a su vez, han reactivado los abanicos aluviales. La obturación de la red de drenaje secundaria y la formación de lagunas represadas al estilo de embalses artificiales puede representar un indicio de estos procesos llano adentro. Sin embargo, todavía no se puede descartar la influencia de paleoclimas en la evolución del drenaje del piedemonte y el llano en general.

El conjunto de variables en la evolución reciente del Piedemonte Llanero indica una dinámica acelerada en el desarrollo de terrazas, cambios de curso y la formación de nuevos abanicos. Estos procesos constituyen amenazas naturales que tienen y tendrán un impacto potencial grande sobre la infraestructura y los asentamientos humanos de la región. Estudios futuros tendrán que concentrarse en una fotointerpretación y cartografía detalladas de los depósitos cuaternarios junto con un análisis sedimentológico con datación absoluta para reconstruir con precisión la evolución reciente del paisaje y evaluar el grado de riesgo que existe.

### **Referencias bibliográficas**

- Baker, V. (1986). "Fluvial landforms". *Geomorphology from space, a global overview of regional landforms*. (Eds.) N. Short & R. Blair, NASA. p. 255-315.
- Chorley, R., Schumm, A. & Sugden, D. (1984). *Geomorphology*. Methuen Co., New York, p 605.
- Forero, M. C. (1977). "Patrones de dunas de los Llanos Orientales sobre imágenes ERTS-MSS y fotografías aéreas". *Revista CIAF*, Bogotá. Vol. 4 (1), p. 71-82.
- Goosen, D. (1971). *Physiography and soils of the Llanos Orientales*,

*Colombia*. ITC, Holanda.

Khobzi, J. (1981). "Los campos de dunas del norte de Colombia y de los Llanos del Orinoco (Colombia y Venezuela)". *Revista CIAF*, Bogotá Vol. 4 (1), p. 257-92.

Lecce, S. (1990). "The alluvial fan problem". *Alluvial Fans , a field approach*. Ed. A. Rachocki and M. Church. J. Wiley, Chichester, U.K. p. 3-24.

Page W. D. (1986). "Sesimic geology and seismicity of Northwestern Colombia". Report to Integral & ISA por Woodward-Clyde Consultans, U.S.A.

Renzoni, G. (1992). Mapa Geológico de la Plancha 193, Yopal. Escala 1:100.000, Memoria explicativa, 19p.

Robertson, K. (1989). "Actividad Neotectónica del Piedemonte Llanero , Sector Villavicencio - Tauramena, Colombia". *Mem. V Congr. Col. de Geol.*, Bucaramanga. 22p.

Robertson, K. (1991). "Evolución geomorfológica y riesgos naturales de los abanicos del Piedemonte Llanero, Colombia". *I Congreso Ing. Geográfica*, Bogotá, Colombia.

Robertson, K. (1992). "Amenazas naturales asociadas a los sistemas fluviales y abanicos del Piedemonte Llanero, Colombia". *I y Men. V Simposio Internacional sobre sensores remotos y SIG para riesgos naturales*. Bogotá, Colombia, p 114-127.

Sabin, F. (1987). *Remote sensing , principal and interpretation*. 2 Ed. Freeman & Comp., New York.

Segovia, A. (1963). "The geology of Planch L-12, Peñalosa-Medina". Tesis Ph.D., Pensylvania State University.

Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. J. Wiley, New York.

Schumm, S. (1986). "Alluvial river response to active tectonic". *Active*

*Los sensores remotos aplicados...*

*Tectonics*. Natl. Acad. Press, Washington p. 45-62.

Ulloa, C., y Rodríguez, E. (1981). "Geología del cuadrángulo K-13, Tauramena". *Ingeominas, Bol. Geol.*, Vol. 24, No. 2, Bogotá, p. 2-30.

Van Der Hammen, T. (1973). *Palynological record of the upheaval of the Northern Andes; A study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Eastern Cordillera*. Elsevier, Amsterdam.

Wijmstra, T., & T. Van Der Hammen. (1966). "Palynological data and the history of Tropical savannas in northern South America". *Leidse Geol. Med.* Vol. 38, p.71-90.