

# Convenio Filial número 1 entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá D.C. y el Institut Cartogràfic de Catalunya

## Detalle de los productos digitales entregados

27 de septiembre de 2007

### Curso (Disco 1/2)

- Curso\_Bogota\_Julio\_2007.ppt

### Imágenes\_SLC

- 19920617 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - 360 NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA19920617\_151835\_00000015C085\_00168\_04822\_0679.E1.PS
  - VDF\_DAT.001
- 19930217 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA19930217\_151827\_00000015C092\_00168\_08329\_0712.E1.PS
  - VDF\_DAT.001
- 19930811 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA19930811\_151838\_00000015C097\_00168\_10834\_0295.E1.PS
  - VDF\_DAT.001
- 19971018 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - SAR\_IMS\_1PXESA19971018\_151835\_00000015A026\_00168\_13048\_0303.E2.PS
  - VDF\_DAT.001
- 19980620 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA19980620\_151828\_00000015A033\_00168\_16555\_0677.E2.PS
  - VDF\_DAT.001

- 19980725 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA19980725\_151832\_00000015A034\_00168\_17056\_0681.E2.PS
  - VDF\_DAT.001
- 20000205 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA20000205\_151831\_00000015A050\_00168\_25072\_0685.E2.PS
  - VDF\_DAT.001
- 20000311 (Disco 1/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA20000311\_151833\_00000015A051\_00168\_25573\_0297.E2.PS
  - VDF\_DAT.001
- 20011201 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
  - LEA\_01.001
  - NUL\_DAT.001
  - orbita.prc
  - orbita\_next.prc
  - SAR\_IMS\_1PXESA20011201\_151632\_00000016A069\_00168\_34591\_0351.E2.PS
- 20030301 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20030719 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20030927 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20040911 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20041120 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20041225 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20051105 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001
- 20060218 (Disco 2/2)
  - DAT\_01.001

**Informe (Disco 1/2)**

- Informe.pdf

**Ortoimagen\_radar (Disco 1/2)**

- ortoimagen\_radar.tfw
- ortoimagen\_radar.tif

**Resultados (Disco 1/2)**

- deformacion\_DInSAR\_Bogota\_1992\_2006.dbf
- deformacion\_DInSAR\_Bogota\_1992\_2006.mdb
- deformacion\_DInSAR\_Bogota\_1992\_2006.txt
- leeme.txt

FECHA:	19 de Septiembre de 2007
PARA:	DPAE
DE:	Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC)
ASUNTO:	Estudio DInSAR sobre la ciudad de Bogotá

# **Estudio Interferométrico Diferencial SAR (DInSAR) para la monitorización de deformaciones del terreno en la ciudad de Bogotá (Colombia)**

FECHA:	19 de Septiembre de 2007
PARA:	DPAE
DE:	Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC)
ASUNTO:	Estudio DInSAR sobre la ciudad de Bogotá

## Índice

1	MEMORIA DE EJECUCIÓN .....	3
2	INTRODUCCIÓN .....	4
3	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE DINSAR CLÁSICO.....	7
4	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE DINSAR AVANZADO.....	10
5	ALTOS DE LA ESTANCIA.....	24
6	CONCLUSIONES .....	27
7	ESTUDIOS FUTUROS.....	28

## 1 Memoria de Ejecución

- El objetivo del presente proyecto ha sido la evaluación de las técnicas DInSAR (Interferometría Diferencial SAR) para la monitorización de deformaciones del terreno mediante datos radar de satélite.
- Como campo de estudio se ha elegido la ciudad de Bogotá (Colombia).
- Inicialmente se han utilizado 16 imágenes SAR adquiridas entre 1992 y 2006. Posteriormente, debido al interés suscitado sobre el año 2001 y a la falta de datos en esas fechas, se ha adquirido la única imagen ERS-2 disponible de 2001. Finalmente, dicha imagen no ha podido ser procesada debido a la gran desviación del Doppler Centroid que presenta.
- Después del procesado DInSAR avanzado de los datos se han detectado diversas zonas con subsidencias continuas en la zona urbana de Bogotá.
- A petición del DPAAE se ha estudiado la zona de Altos de la Estancia, donde durante los últimos años se han hecho evidentes fuertes problemas de deslizamientos de tierra. En esta zona los datos de satélite no son los más idóneos debido a la falta de frecuencia temporal. Para estos casos se recomienda la utilización de un sistema radar terrestre.
- Durante el curso realizado en la ciudad de Bogotá se realizó una visita a Altos de la Estancia en la cual se pudo constatar la problemática de los deslizamientos.
- Para la evaluación final del proyecto se ha pedido a diversas instituciones la disponibilidad de medidas sobre el terreno realizadas durante los últimos años. Con la llegada de dichos datos y su comparación con los resultados DInSAR se finalizará el presente proyecto.

## 2 Introducción

En este informe se presentan los resultados DInSAR para la monitorización de subsidencias en la ciudad de Bogotá. La Tabla 1 presenta el conjunto de imágenes SAR utilizadas en el estudio.

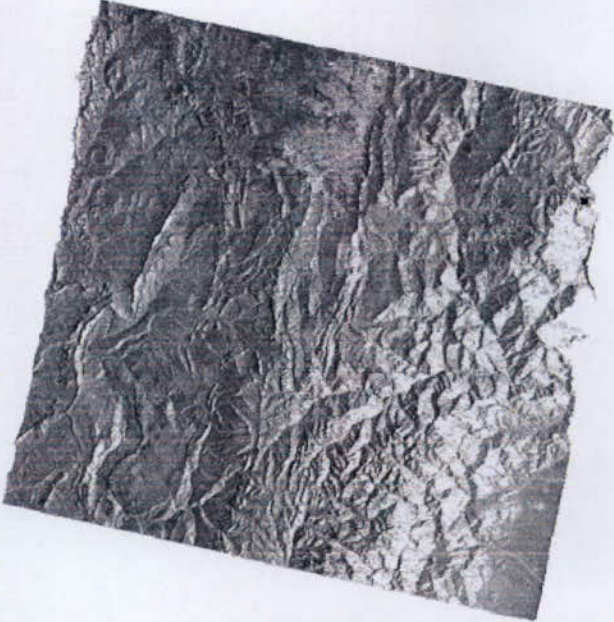
	Fecha	Órbita	Satélite
	1	19920617	4822
2	19930217	8329	ERS1
3	19930811	10834	ERS1
4	19971018	13048	ERS2
5	19980620	16555	ERS2
6	19980725	17056	ERS2
7	20000205	25072	ERS2
8	20000311	25573	ERS2
9	20030301	5232	ENVISAT
10	20030719	7236	ENVISAT
11	20030927	8238	ENVISAT
12	20040911	13248	ENVISAT
13	20041120	14250	ENVISAT
14	20041225	14751	ENVISAT
15	20051105	19260	ENVISAT
16	20060218	20763	ENVISAT

Tabla 1. Conjunto de imágenes SAR de órbita descendente (Track 168 Frame 3519). El trabajo se ha dividido en dos partes, ver Figura 1:

- **Procesado DInSAR clásico:** Generación de un conjunto de interferogramas diferenciales con separaciones temporales y líneas de base moderadas para maximizar la calidad de las medidas. En estos interferogramas las deformaciones del terreno aparecen como cambios de fase de la señal. Sin embargo, estos datos están contaminados por artefactos atmosféricos, decorrelación temporal y ruido térmico, lo que implica que sólo movimientos de gran intensidad podrán ser detectados con las técnicas clásicas.
- **Procesado DInSAR avanzado:** En esta parte del cálculo se utilizan los resultados del tratamiento clásico para estimar de forma precisa la velocidad media de deformación durante todo el intervalo temporal del que se disponen imágenes. Adicionalmente, se calculan las componentes no lineales de deformación, con lo que como resultado final se obtiene una descripción temporal de la deformación del terreno.

Las características de las medidas obtenidas mediante DInSAR son las siguientes:

- Sólo se pueden monitorizar aquellos puntos del terreno que presentan suficiente calidad de fase durante el período de observación. Esto significa que no todos los píxeles de la imagen podrán ser tratados. De todas formas, en zonas urbanas la densidad de los puntos que pueden ser medidos es muy elevada.
- Las medidas temporales obtenidas se restringen a las fechas en las cuales se ha adquirido una imagen SAR. En el caso de datos orbitales la frecuencia de adquisición suele ser muy limitada, lo que implica que no se pueden realizar estudios sobre zonas con movimientos del terreno caracterizados por una gran frecuencia temporal.
- Los puntos anteriores implican que según la disponibilidad de imágenes SAR y dependiendo de las características del terreno, la densidad temporal y espacial de medidas podrá variar.



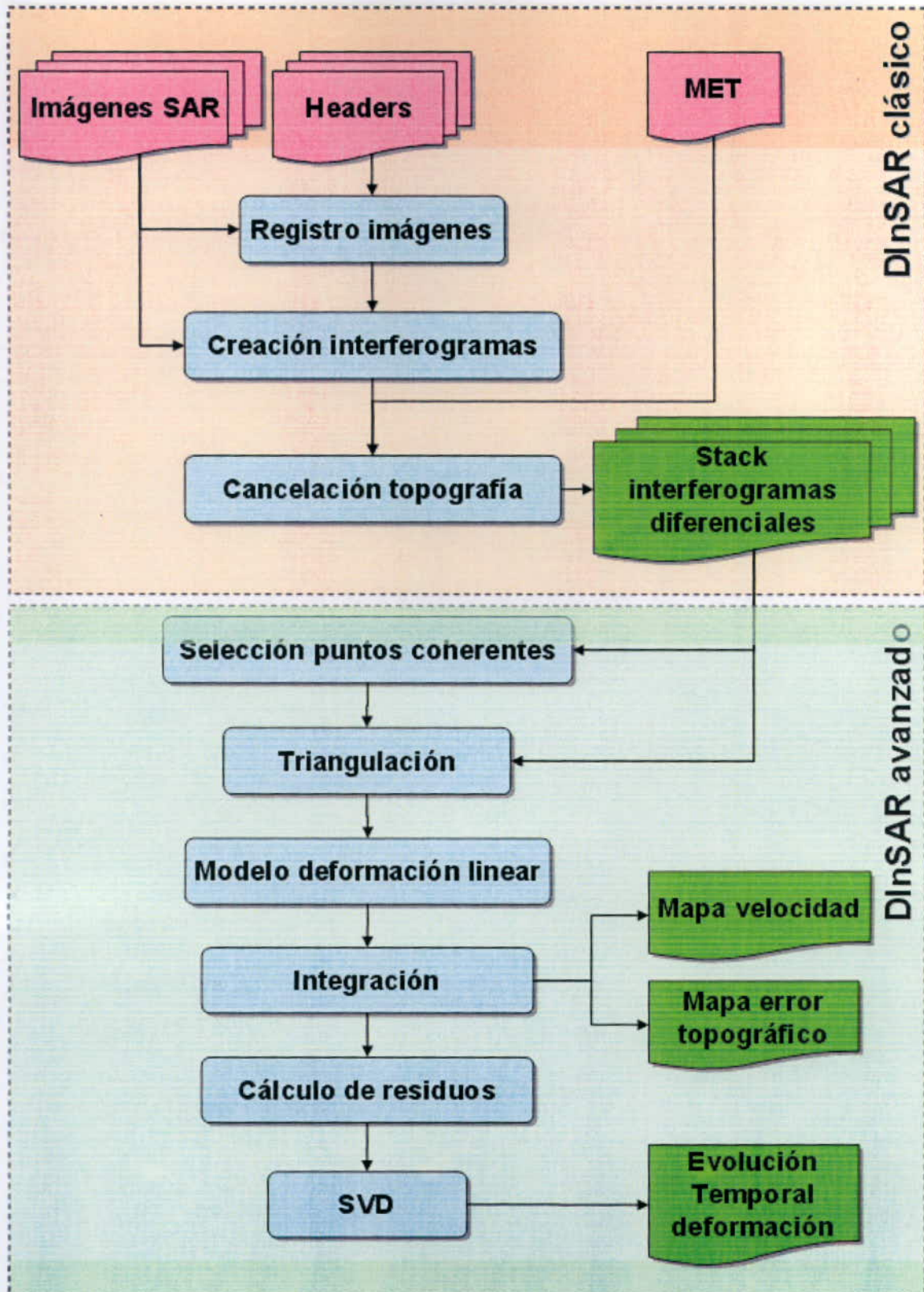


Figura 1. Esquema de procesado DInSAR.

### 3 Resultados obtenidos mediante DInSAR clásico

La zona a estudiar se presenta en la Figura 2, donde se puede observar toda la zona urbana que comprende la ciudad de Bogotá. Esta imagen ha sido creada mediante la combinación radiométrica de las 16 imágenes SAR disponibles.



Figura 2. Imagen SAR de la ciudad de Bogotá.

Utilizando las imágenes SAR presentadas en la Tabla 1 se han generado 21 interferogramas diferenciales. En la Figura 3 se presentan algunos de los más representativos:

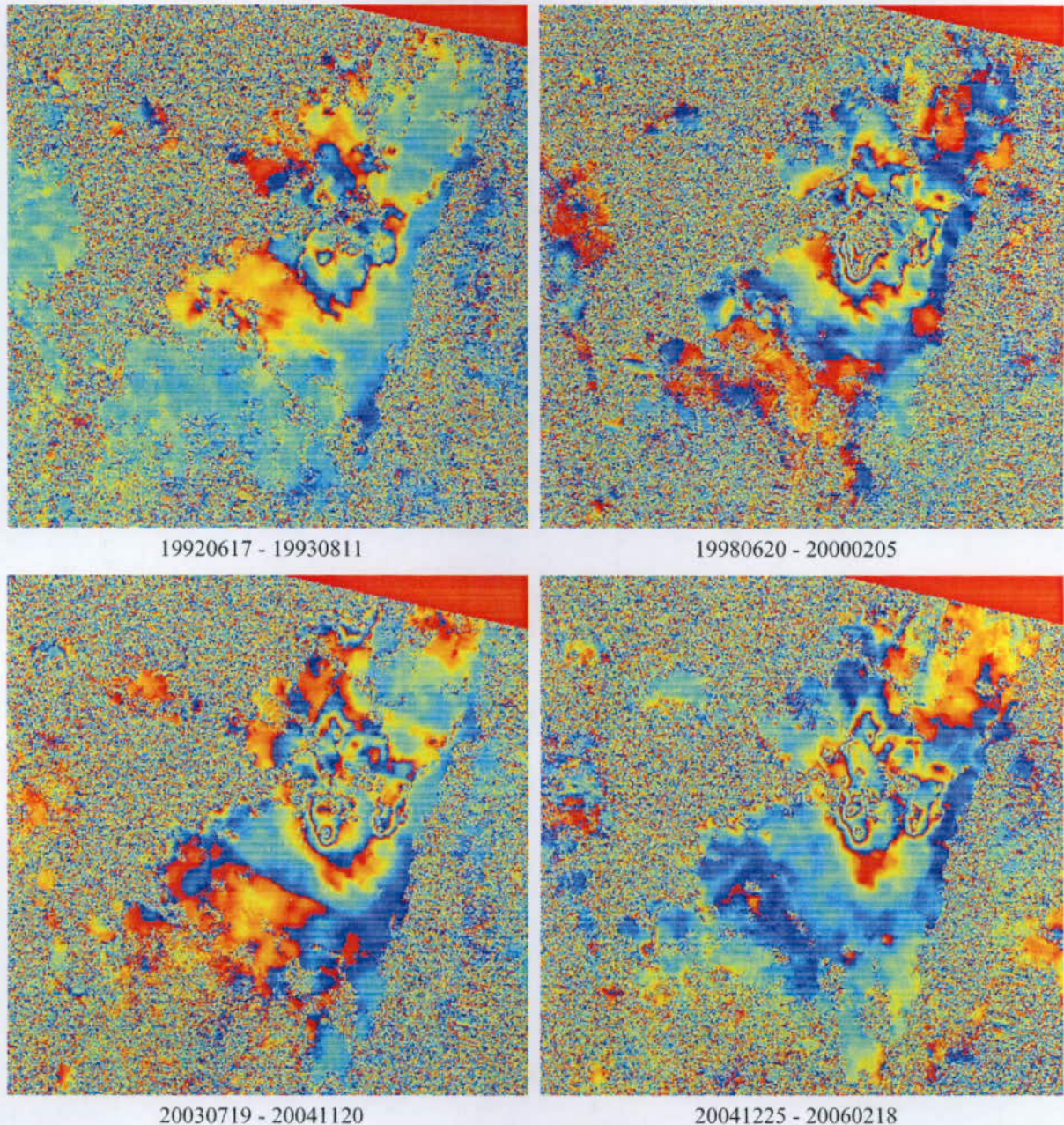


Figura 3. Conjunto de interferogramas diferenciales georeferenciados de la zona de Bogotá.

Observar las diferentes franjas de color que se corresponden con las curvas de nivel de la deformación. Notar que cada ciclo de color se corresponde con un gradiente de movimiento de 2.8 centímetros. Las zonas con cambios de color más suaves no pueden ser directamente relacionadas con deformación, ya que las imágenes están contaminadas por efectos atmosféricos y ruido térmico.

Si se realiza un detalle de la zona central de Bogotá podemos obtener el siguiente mapa de deformación entre Diciembre de 2004 y Febrero de 2006. En esta Figura 4 se pueden observar los fuertes gradientes de deformación en esta zona:

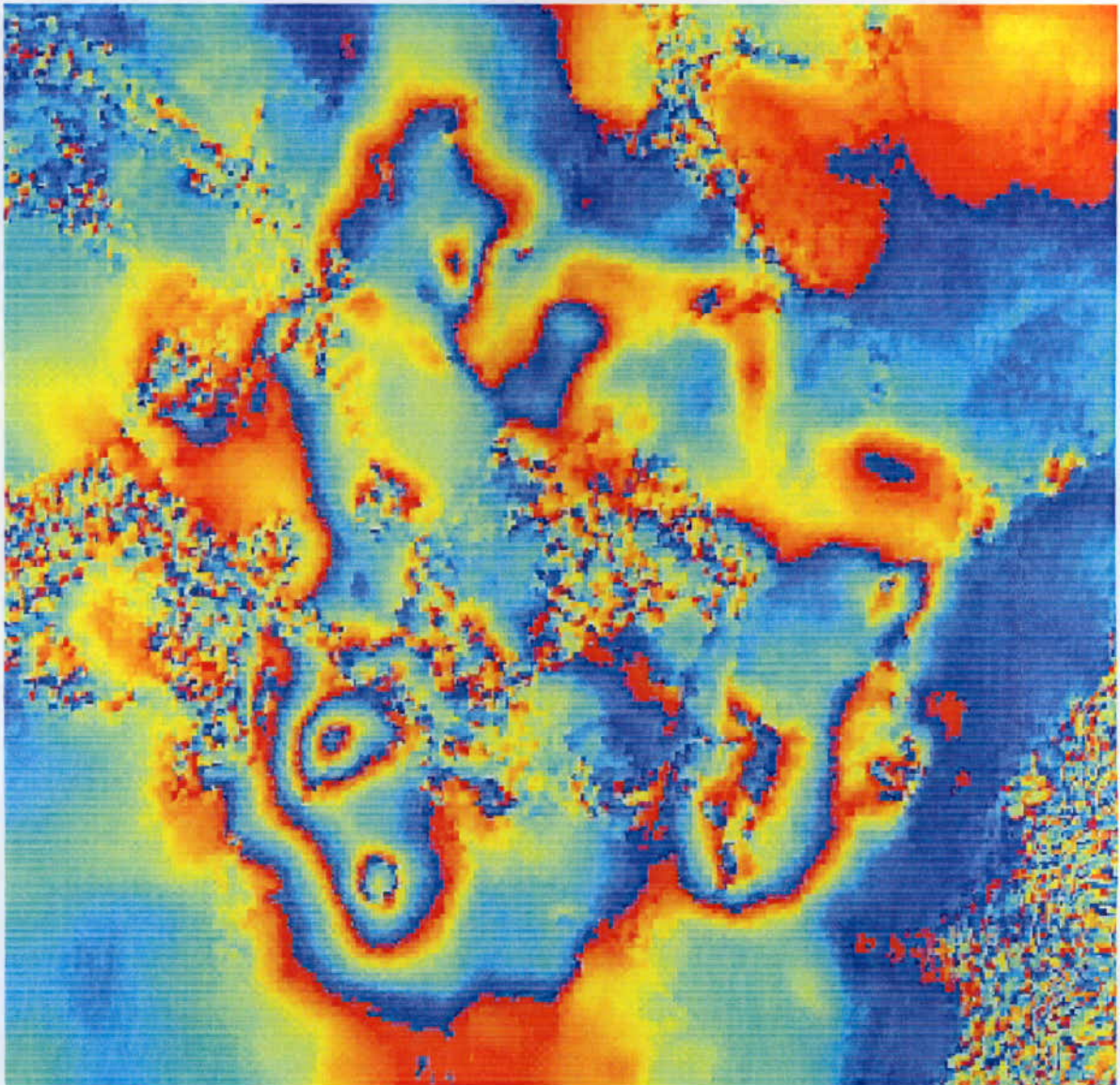


Figura 4. Detalle de interferograma diferencial de la zona central de Bogotá (cada ciclo de color se corresponde a un gradiente de 2.8 cm).

## 4 Resultados obtenidos mediante DInSAR avanzado

Una vez se han obtenido y estudiado los resultados de las técnicas clásicas se puede aplicar la metodología avanzada para obtener productos de precisión relacionados con la velocidad y evolución de las subsidencias. La Figura 5 muestra el esquema de dicho algoritmo.

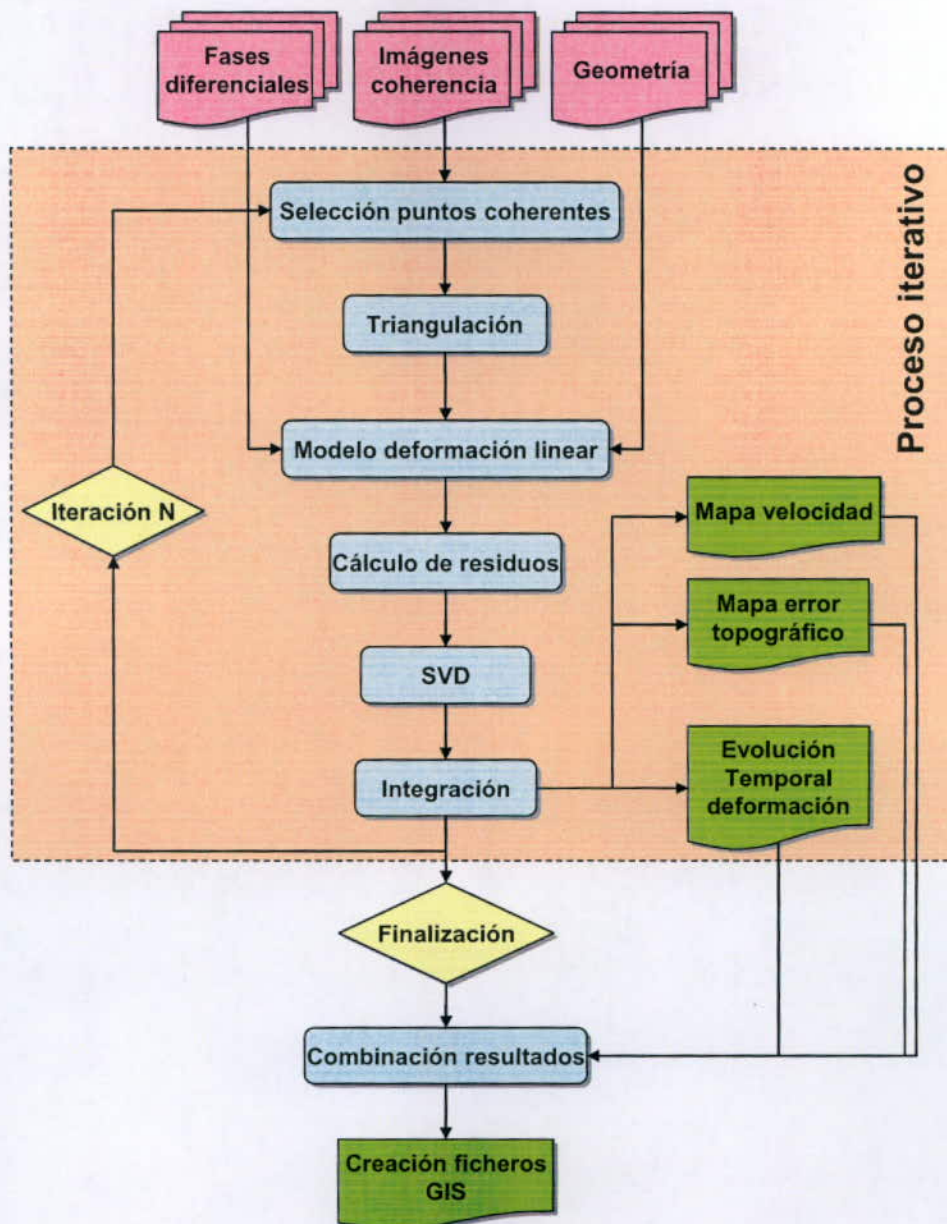


Figura 5. Algoritmo de DInSAR avanzado.

De las Figuras 6 a la 18 se muestran diferentes mapas de velocidad media para toda el área de Bogotá y para diferentes zonas afectadas por fuertes movimientos. En estas Figuras se muestran tanto los mapas con los puntos reales de medida como las imágenes interpoladas.

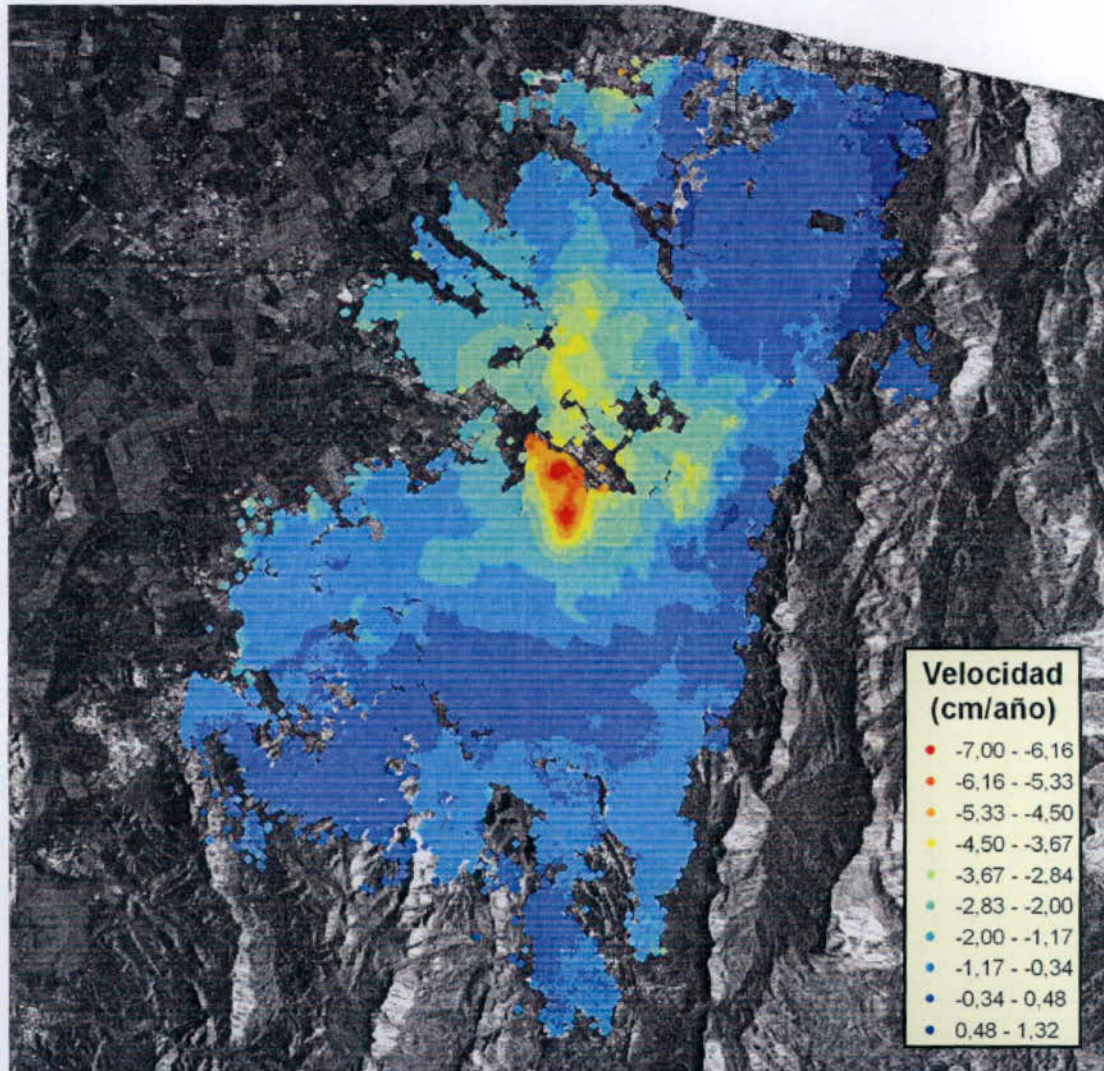


Figura 6. Velocidad media de deformación de los puntos medidos.

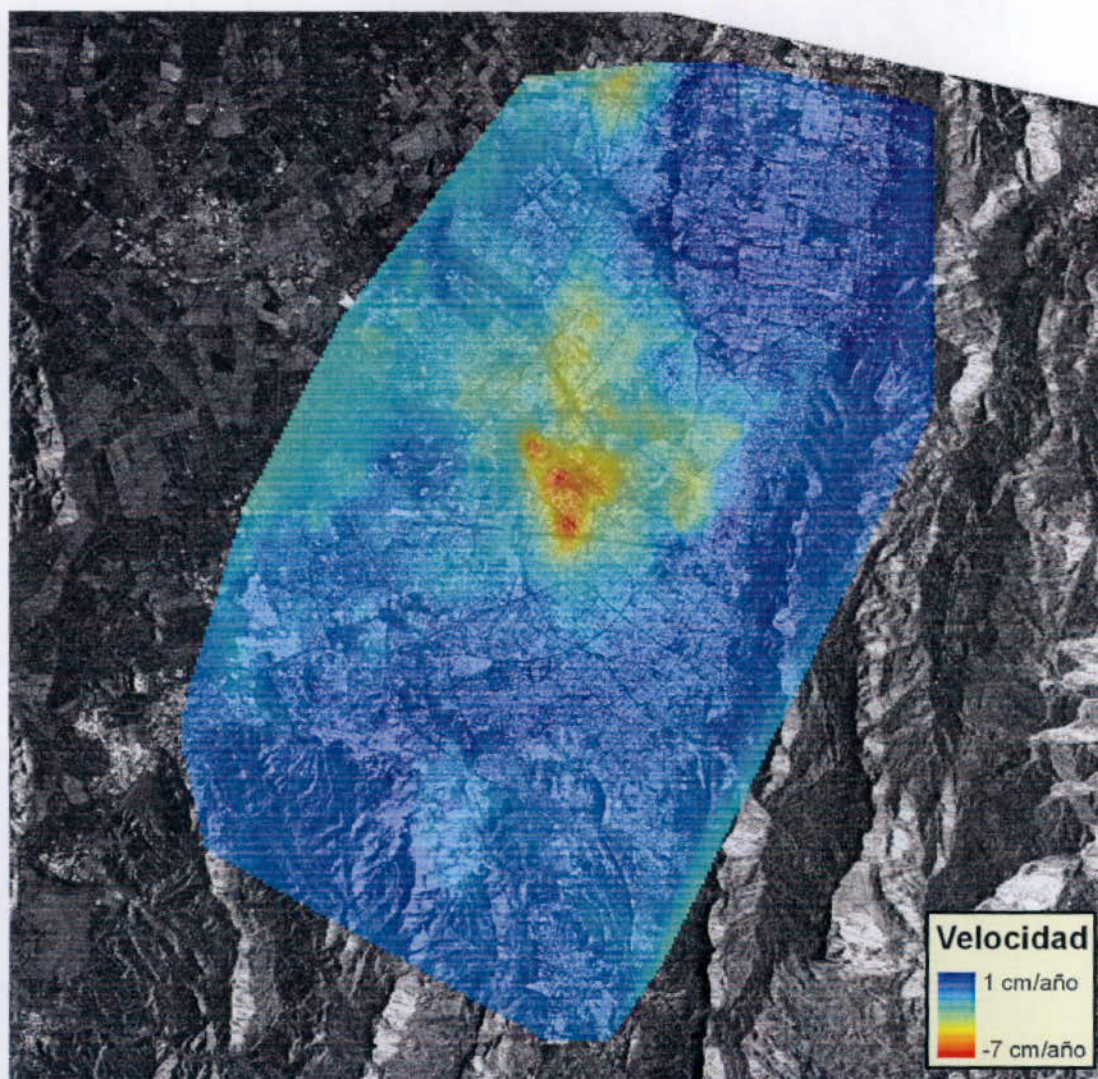


Figura 7. Velocidad media de deformación interpolada.

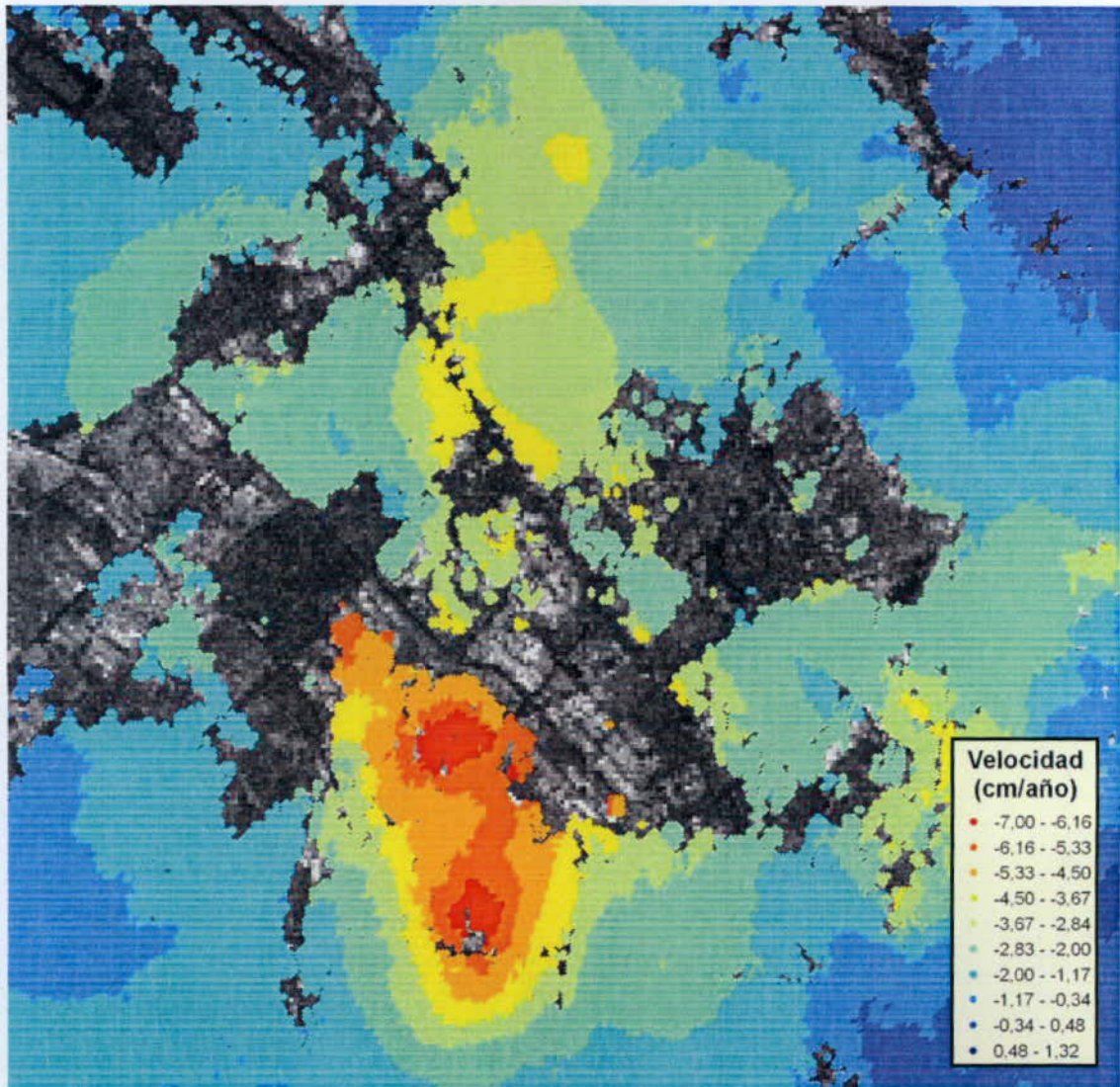


Figura 8. Velocidad media de deformación de los puntos medidos en la zona centro de Bogotá.



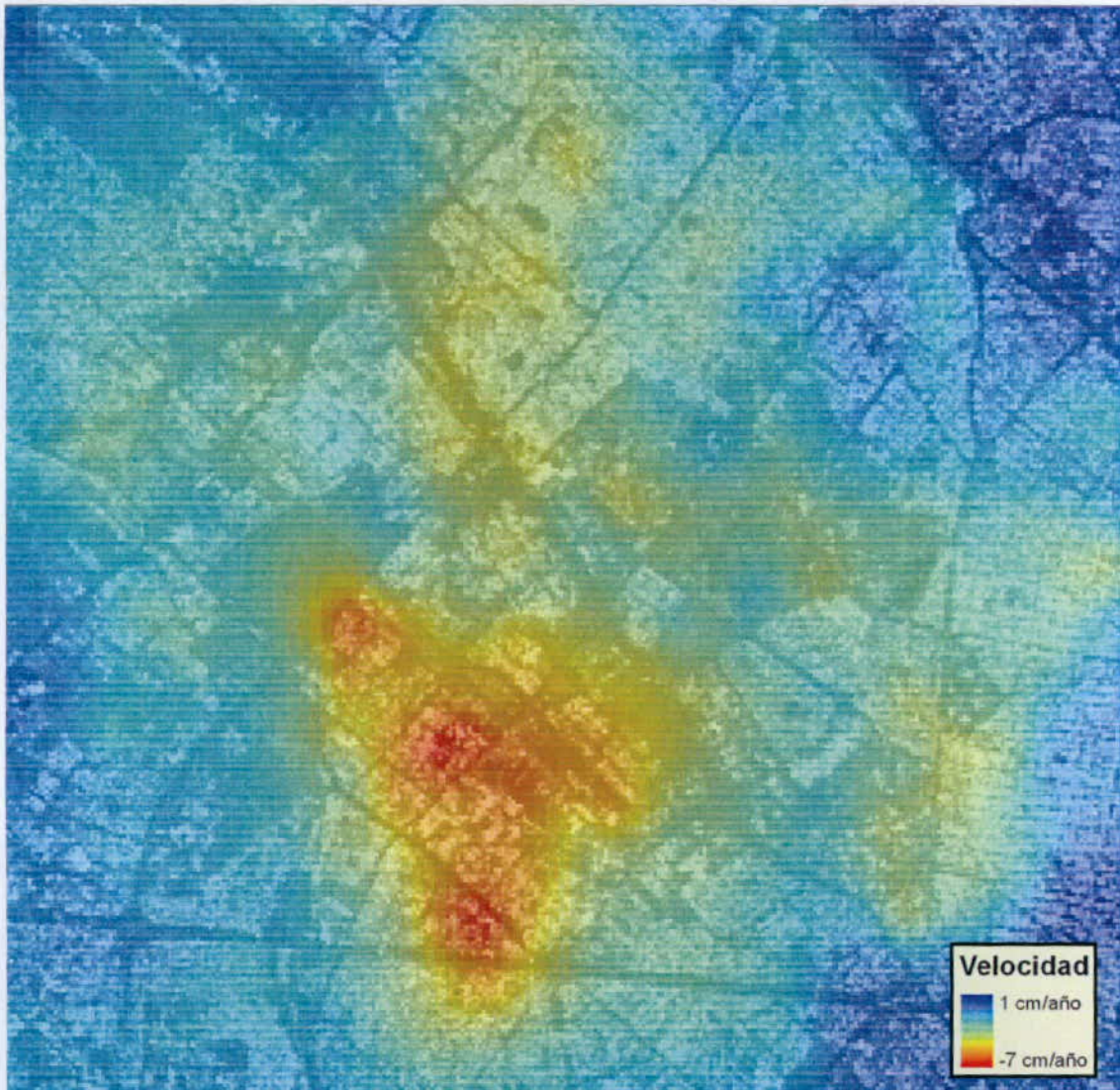


Figura 9. Velocidad media de deformación interpolada en la zona centro de Bogotá.

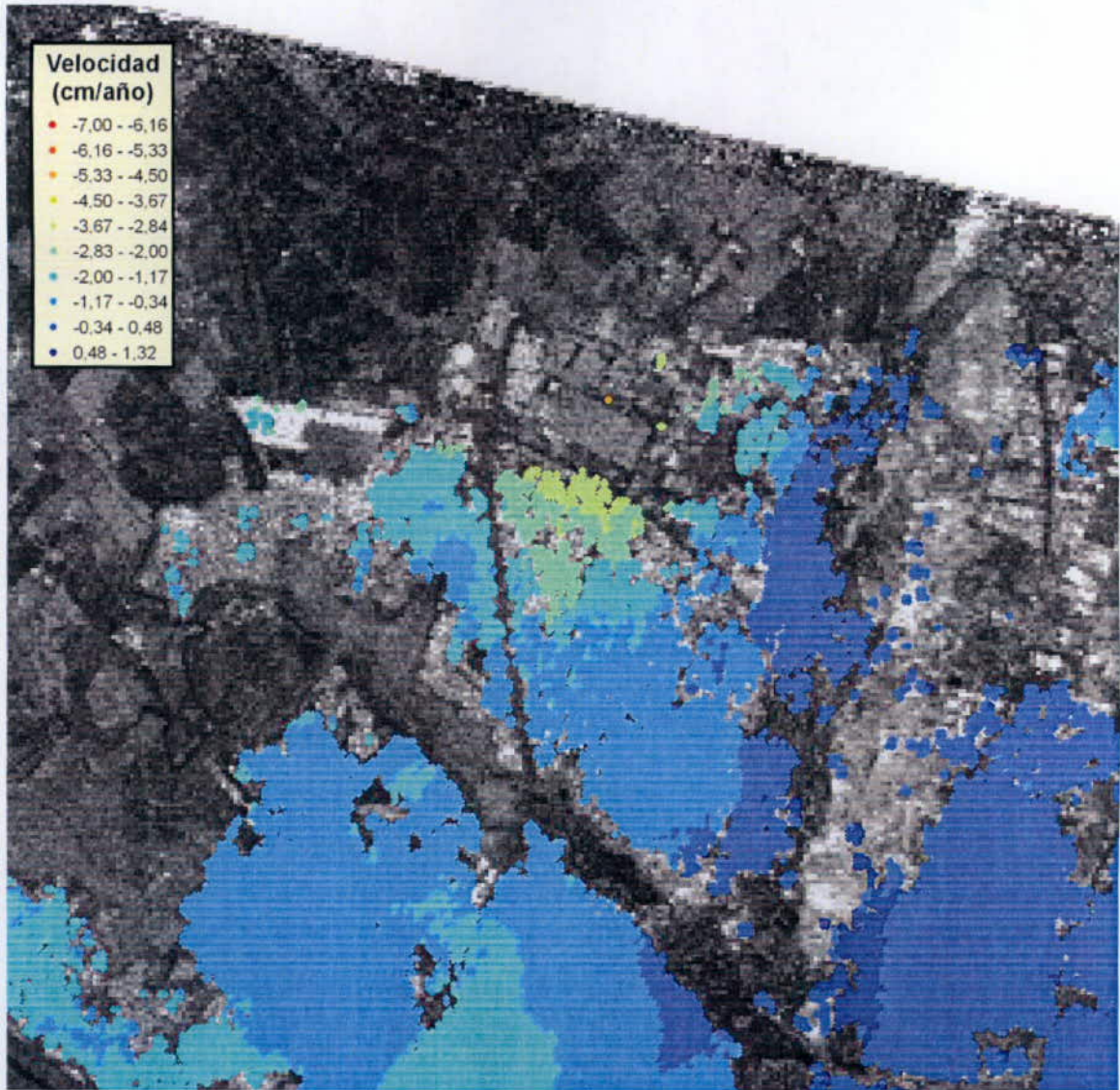


Figura 10. Velocidad media de deformación de los puntos medidos en la zona noroeste de Bogotá.

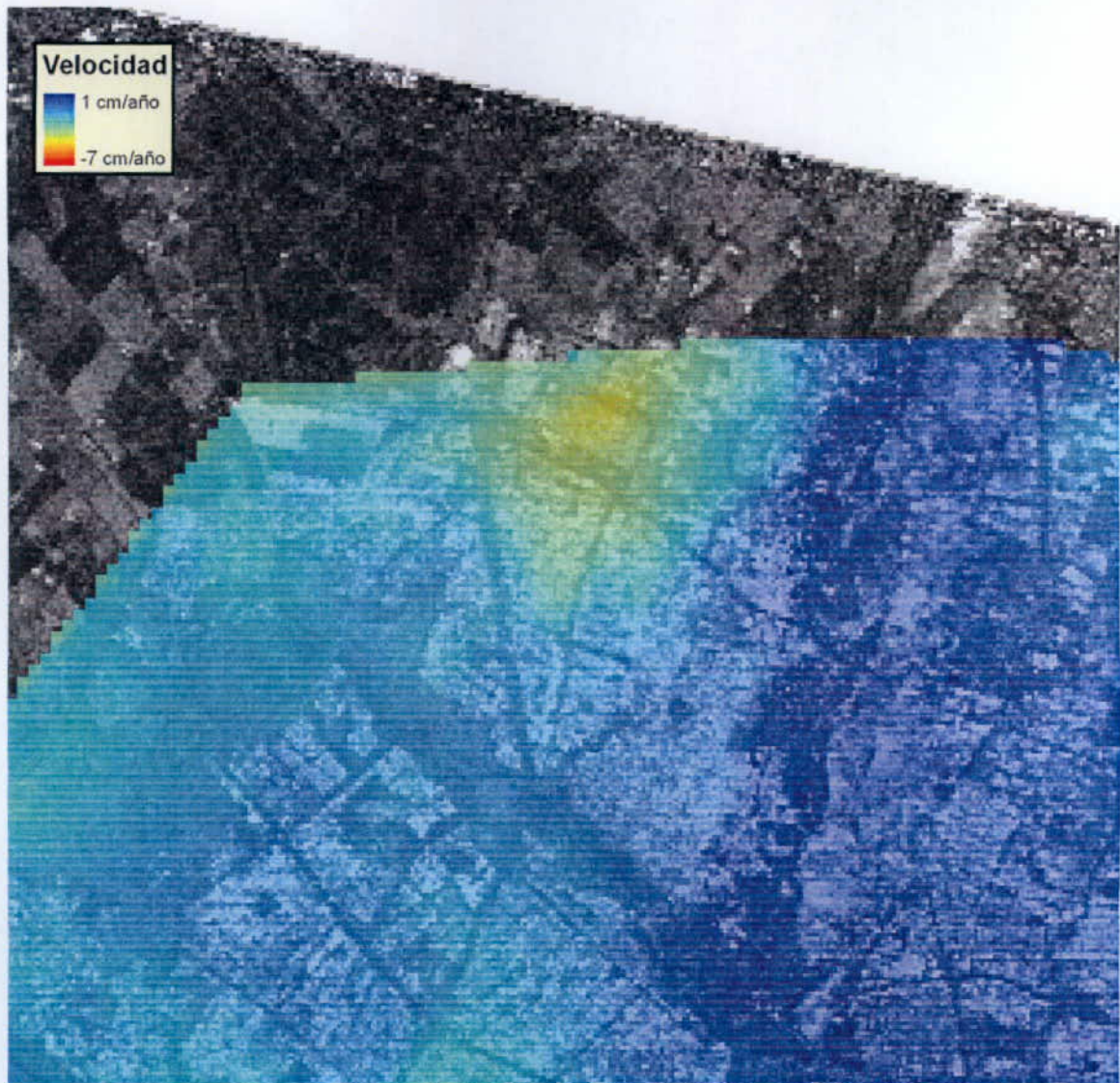


Figura 11. Velocidad media de deformación interpolada en la zona noroeste de Bogotá.

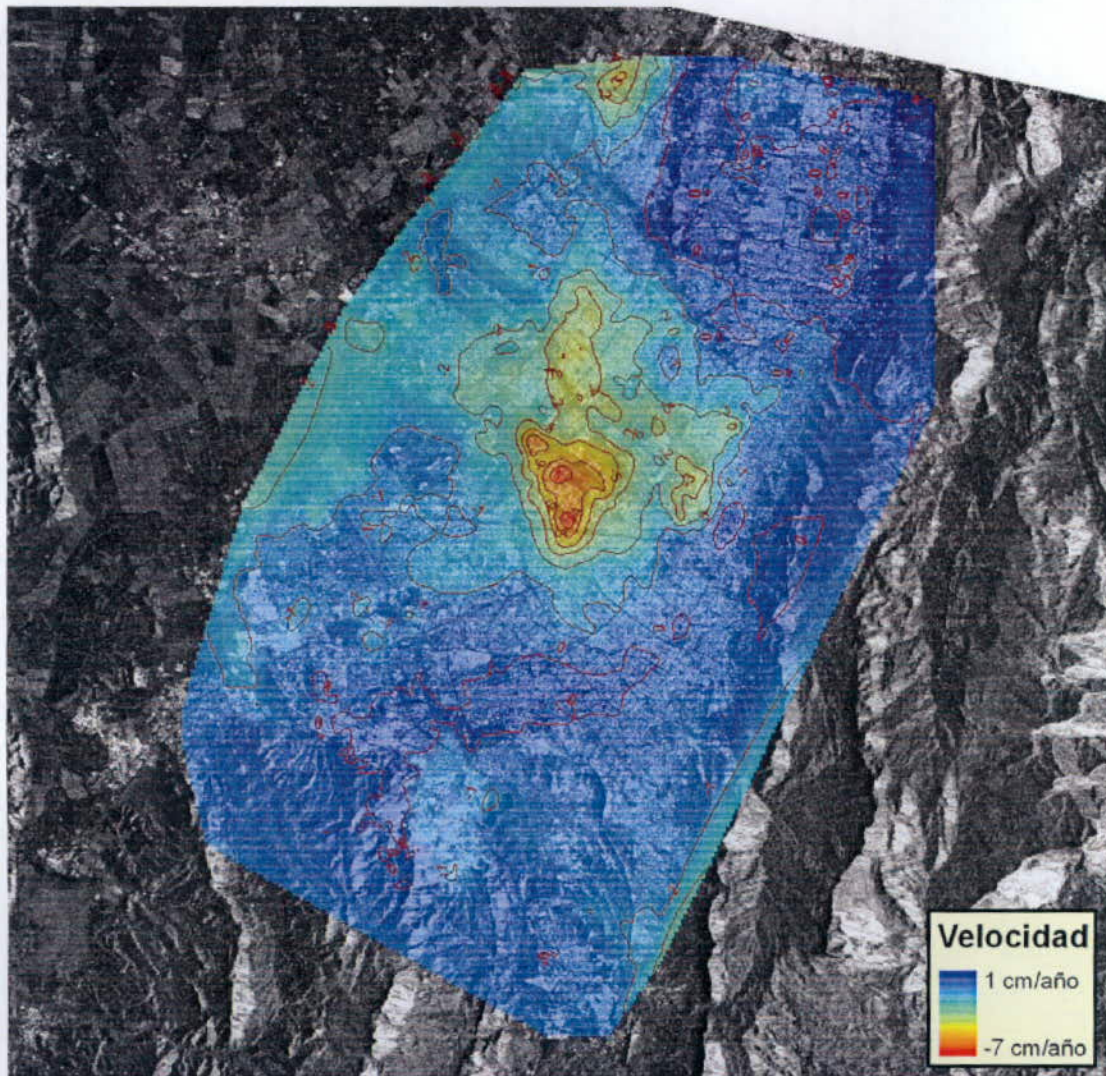


Figura 12. Velocidad media interpolada junto con líneas de deformación.

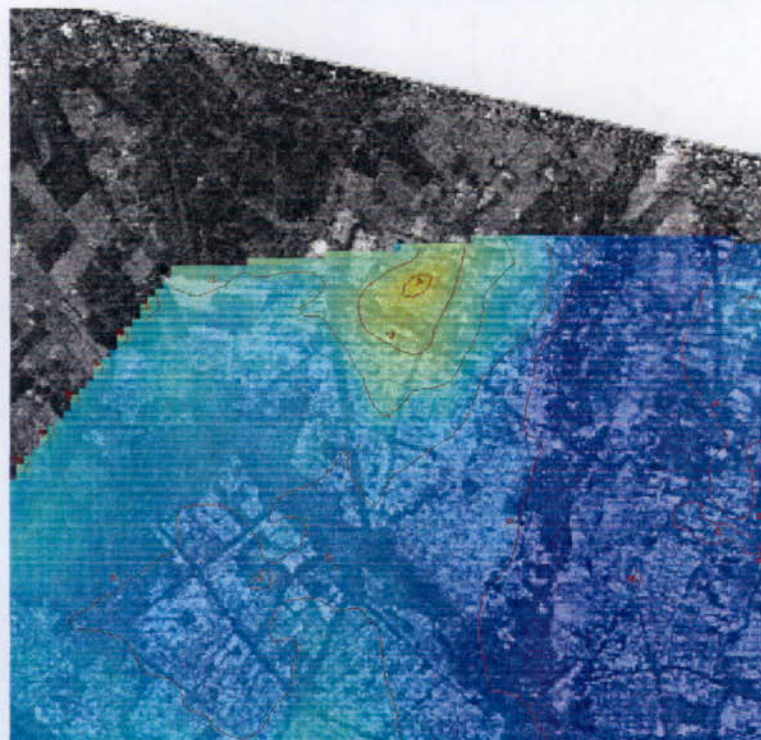
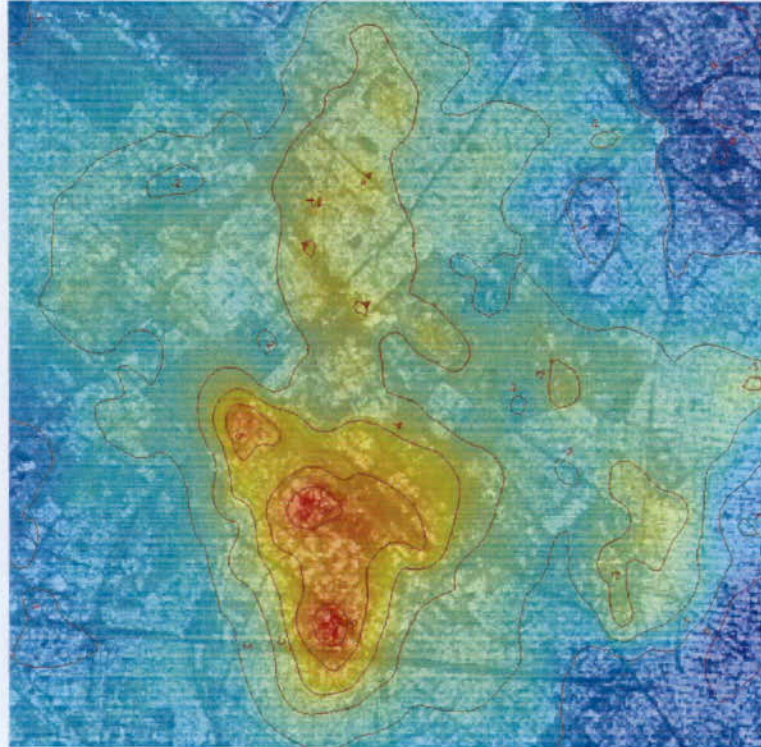


Figura 13. Velocidad media interpolada junto con líneas de deformación.

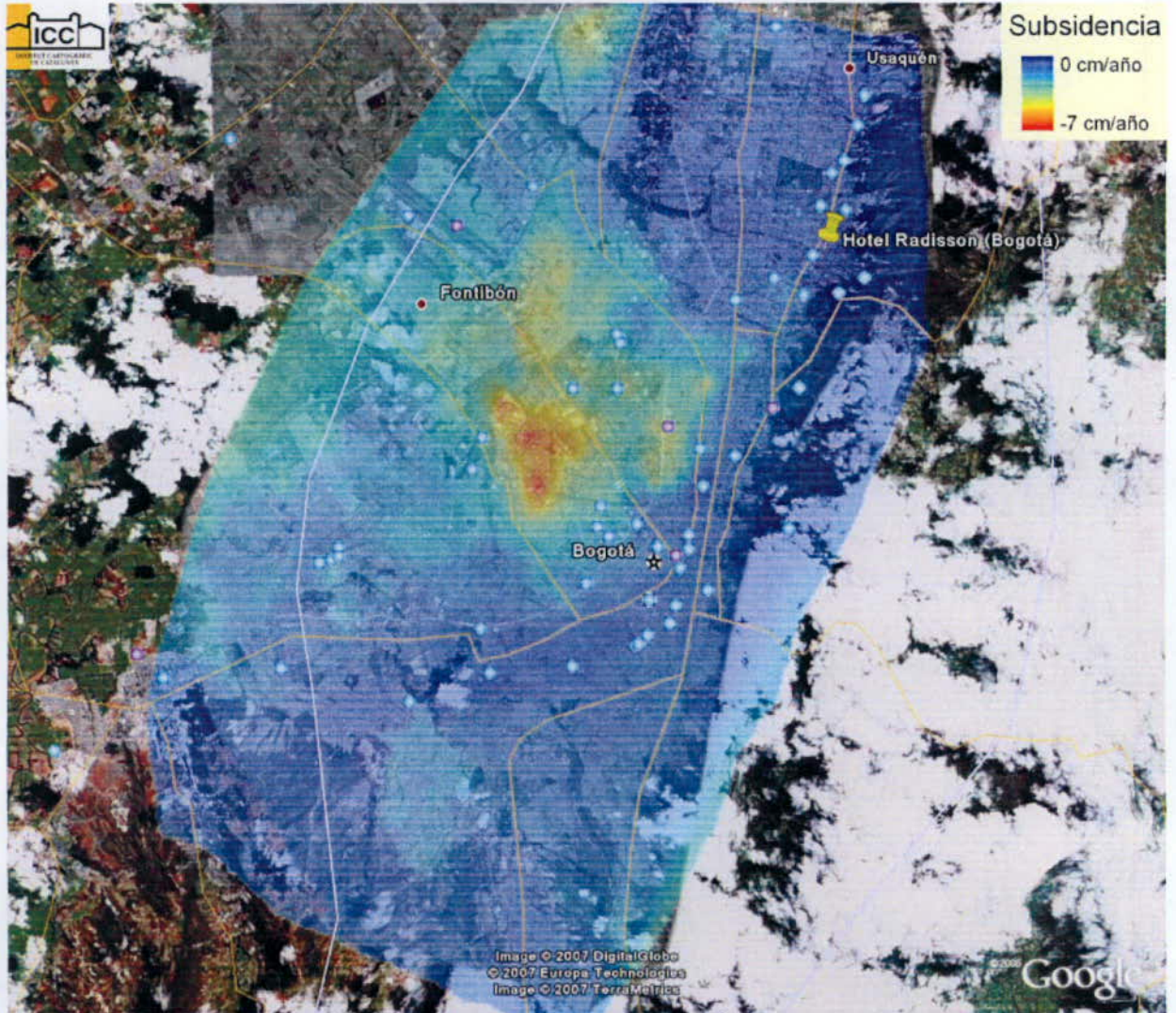


Figura 14. Velocidad media de deformación interpolada sobre el entorno Google Earth.

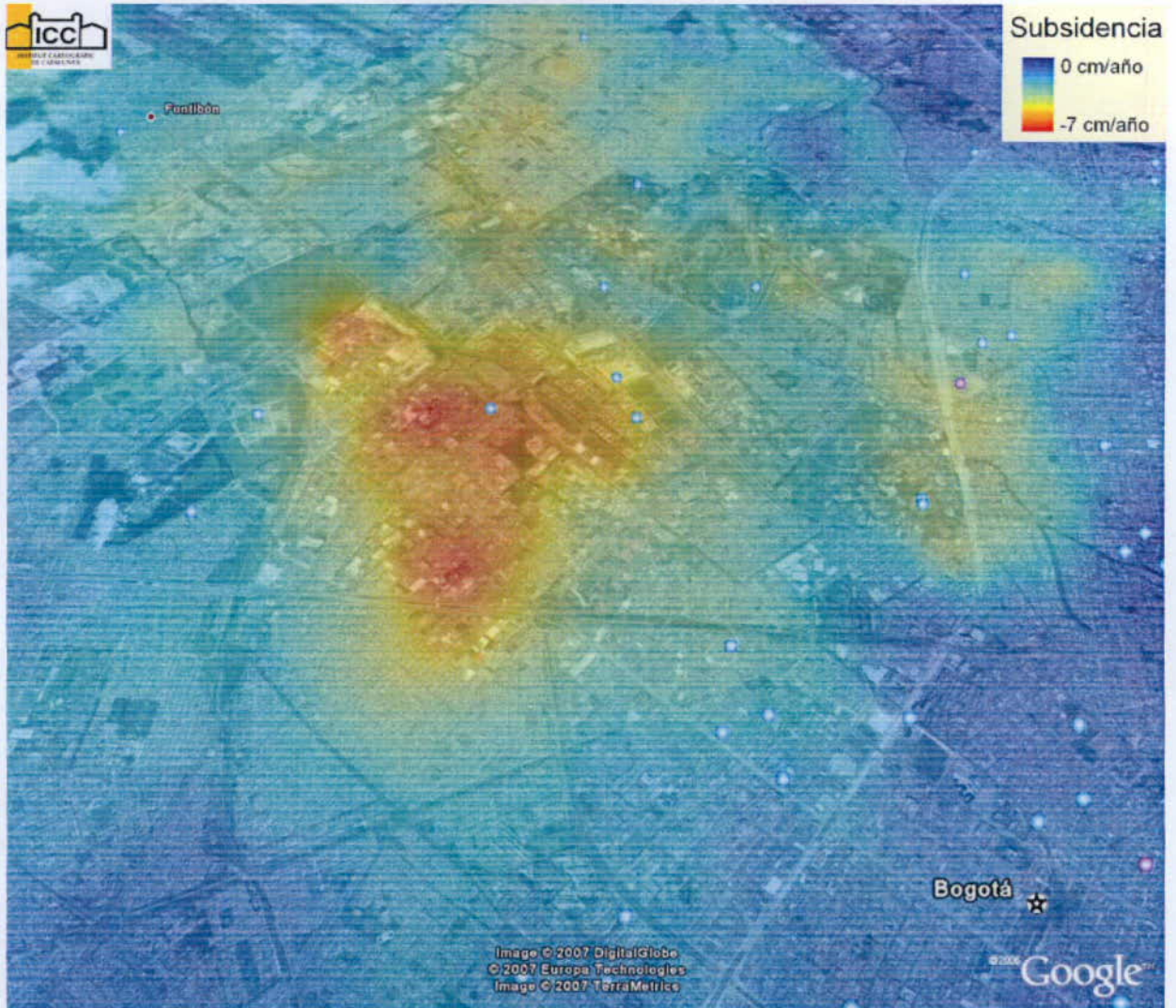


Figura 15. Velocidad media de deformación interpolada en la zona centro de Bogotá sobre el entorno Google Earth.

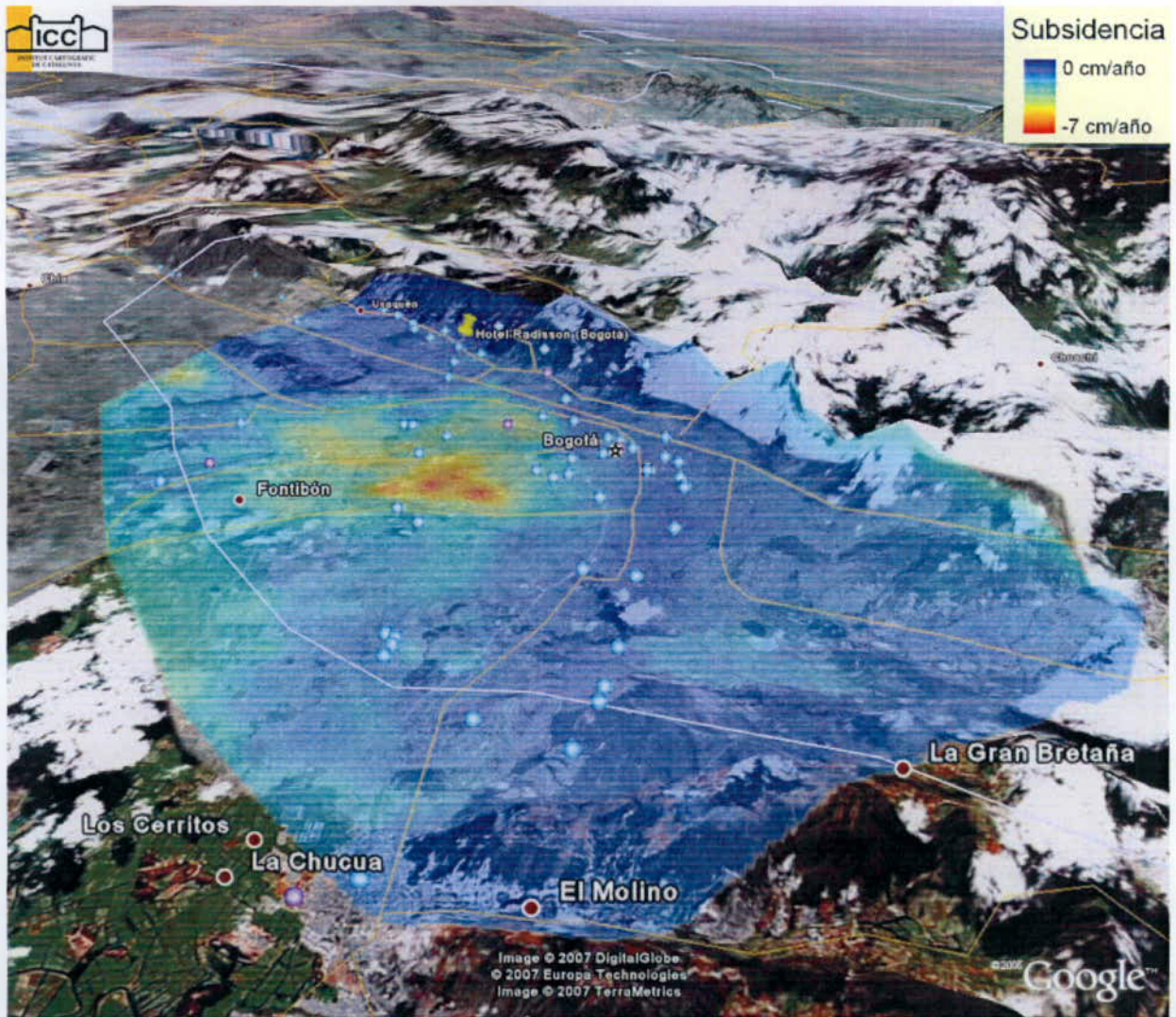


Figura 16. Perspectiva de la velocidad media de deformación interpolada sobre el entorno Google Earth.



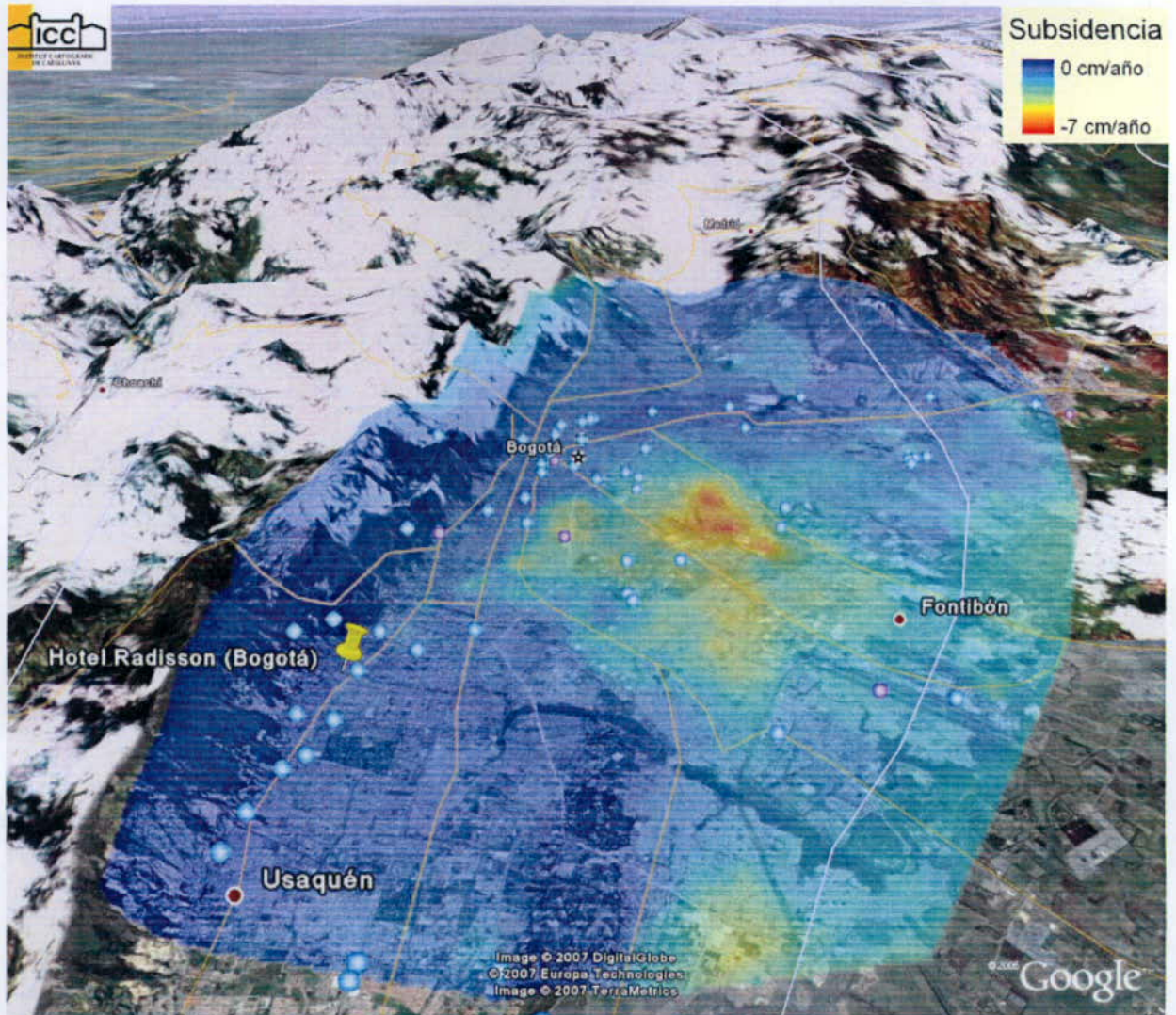


Figura 17. Perspectiva de la velocidad media de deformación interpolada sobre el entorno Google Earth.

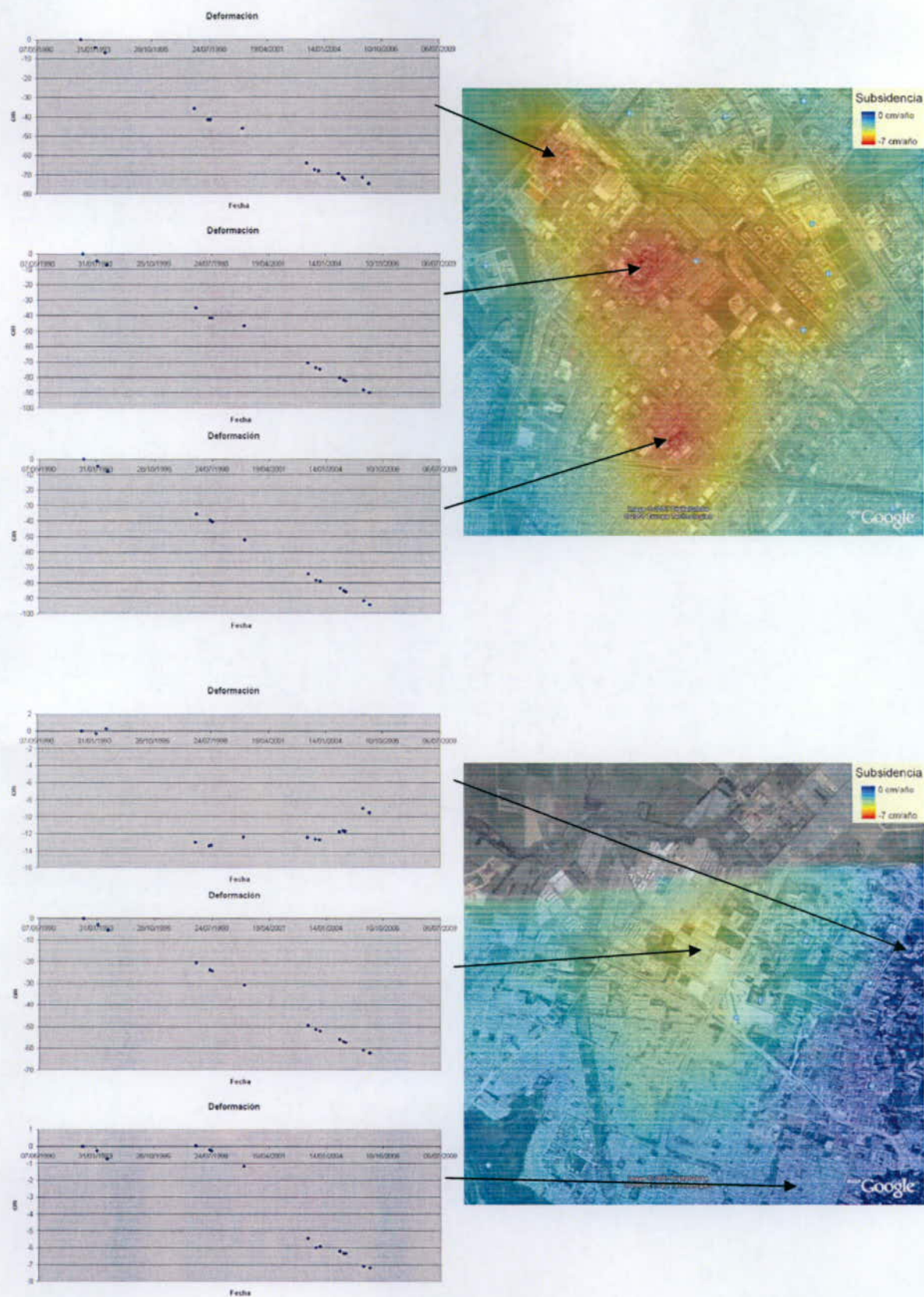


Figura 18. Evolución temporal de la deformación en diversos puntos de Bogotá.

### 5 Altos de la Estancia

En la Figura 19 se muestra la posición de los puntos de medida de nivelación (zona de Altos de la Estancia) junto con los puntos medidos DInSAR. Para realizar la comparativa de evolución de deformación se han escogido 2 puntos físicamente coincidentes en los dos tipos de medida. Dichos puntos son los denominados B2 y M11.

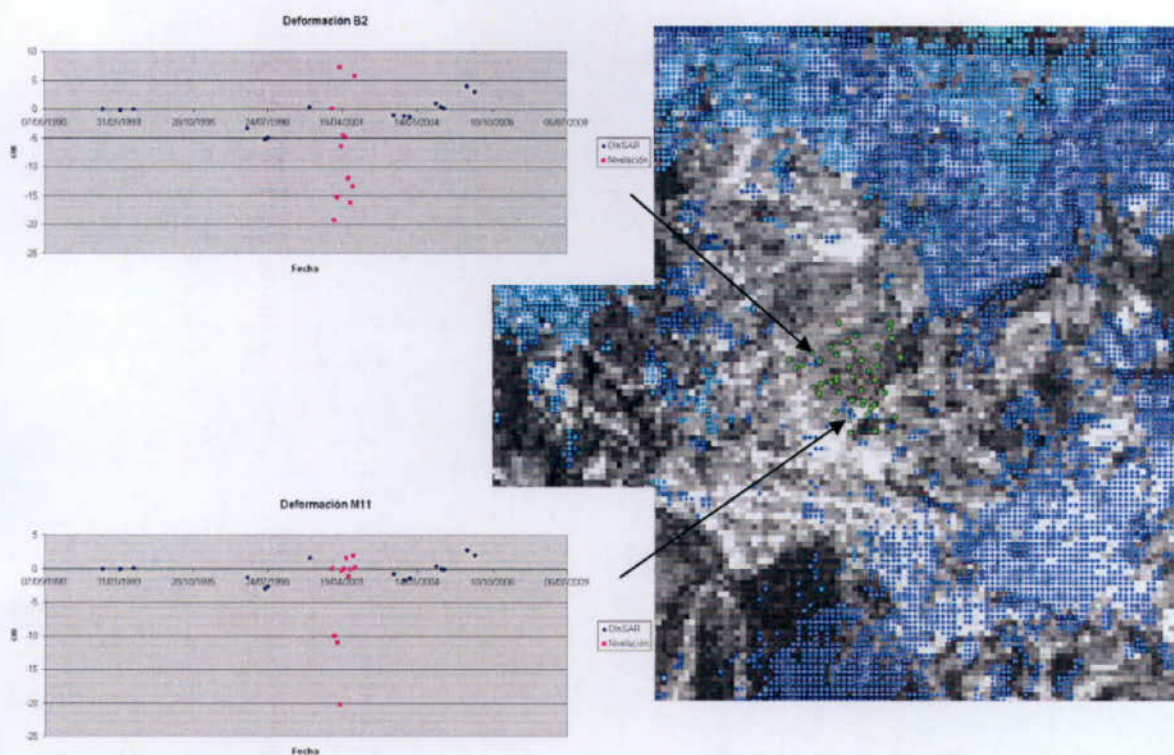


Figura 19. Posición de los puntos de nivelación (triángulos) respecto a las medidas DInSAR (círculos).

Tal como se aprecia en la Figura 19 existen diferencias en la evolución temporal entre las medidas de nivelación y los resultados DInSAR. Estas diferencias pueden ser debidas a las características extremas del deslizamiento (fuertes movimientos no lineales en áreas reducidas de terreno, ver Figura 20), ya que las medidas DInSAR avanzadas mediante satélite sólo pueden monitorizar subsidencias lentas a baja resolución (30 x 30 metros).

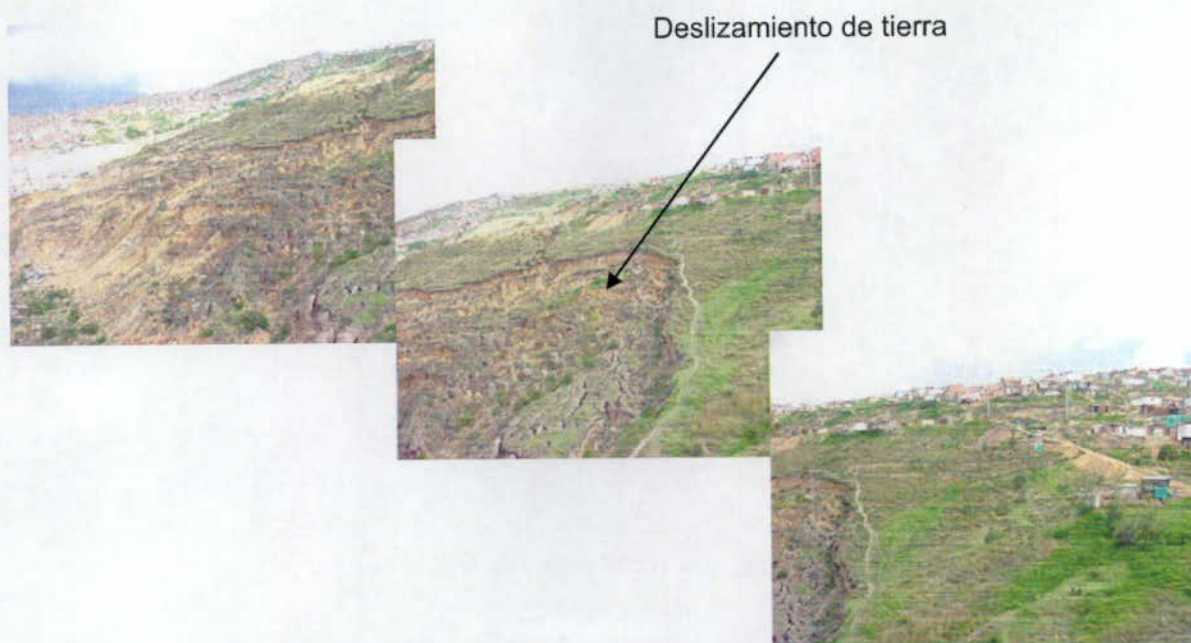


Figura 20. Detalle de un fenómeno de deslizamiento en Altos de la Estancia.

Las técnicas avanzadas DInSAR no pueden obtener resultados óptimos sobre zonas de baja coherencia, como es el caso de Altos de la Estancia, por ello es más interesante optar por una metodología clásica. La Figura 21 muestra dos interferogramas de la zona. En el primero (1993) de ellos no existen franjas de deformación de fase, mientras que en el segundo (2004) se puede apreciar un patrón de movimiento.

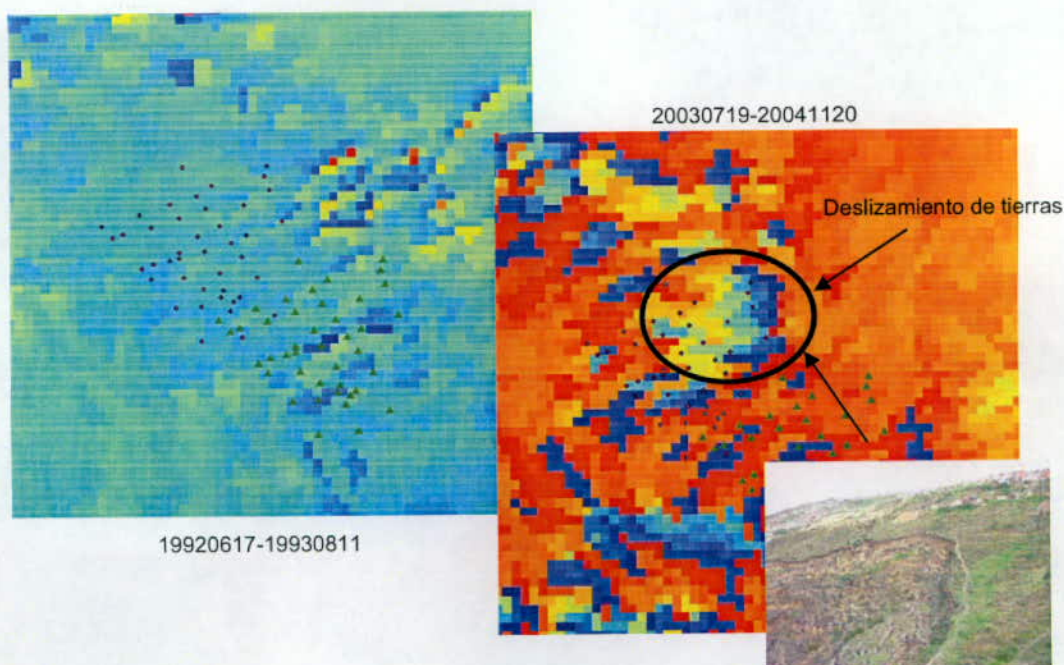


Figura 21. Interferogramas diferenciales de la zona de Altos de la Estancia.

La Figura 22 muestra otros interferogramas (1993 y 2003) donde se vuelve a apreciar la estabilidad de la zona.

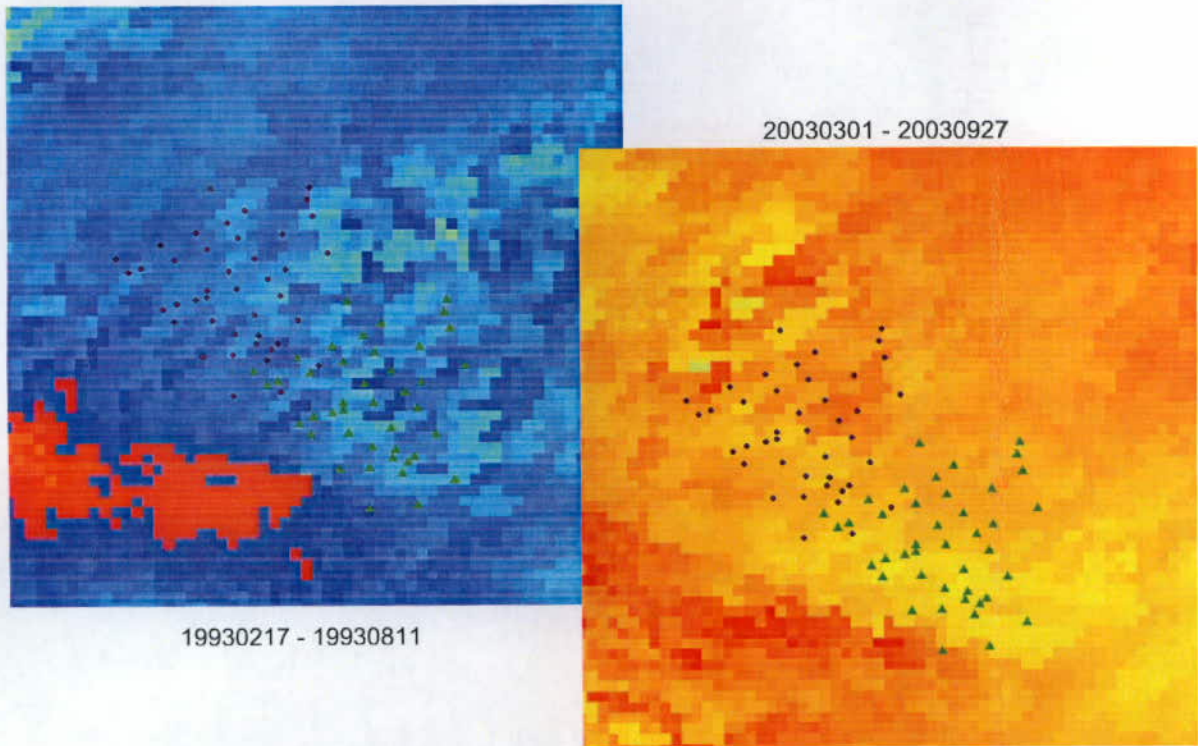


Figura 22. Interferogramas diferenciales de la zona de Altos de la Estancia.

Si comparamos los resultados obtenidos en el perímetro de la zona de subsidencia mediante técnicas clásicas y avanzadas podemos observar como ambas metodologías coinciden en que se produce un movimiento del terreno en el año 2004, ver Figura 23.

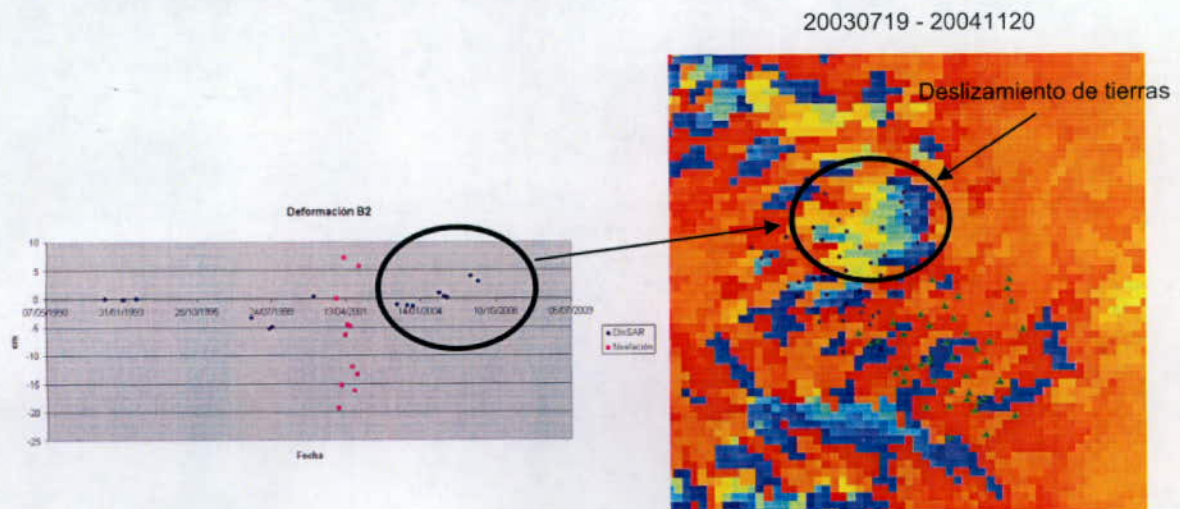


Figura 23. Comparativa de resultados DInSAR clásico vs avanzado.

## 6 Conclusiones

- Se han detectado movimientos de más de 7 cm/año en diversas zonas de Bogotá.
- Las zonas de máxima subsidencia se encuentran en la zona centro y noroeste tal y como se muestra en las Figuras 6-18.
- Se han comprado diversas medidas sobre el terreno realizadas en la zona de Altos de la Estancia con los resultados DInSAR. Dichas medidas han sido realizadas durante el año 2001, año del cual no se tienen medidas SAR.
- La comparativa (Figura 19) evidencia diferencias entre las medidas de nivelación y DInSAR.
  - Los datos de nivelación presentan un rango de deformación en un período temporal corto mayor que las medidas DInSAR, que presentan unas tendencias mucho más marcadas.
  - Estas diferencias pueden ser debidas a las características de la deformación de los Altos de la Estancia. Cabe destacar que las técnicas DInSAR con los sensores actuales son muy adecuadas para monitorizar las tendencias de los movimientos a baja frecuencia temporal y espacial. Si las deformaciones sufridas en los Altos de la Estancia tuviesen un comportamiento de alta variabilidad espacial y temporal, como parece ser el caso, la comparativa entre ambos métodos se tendría que complementar con datos y métodos adicionales.

## 7 Estudios futuros

Para profundizar en la comprensión de los fenómenos de deformación en la ciudad de Bogotá se presentan diversas recomendaciones, tales como:

- Trabajo conjunto con expertos geólogos y geotécnicos para estudiar las diferentes tipologías de subsidencia conocidas en la ciudad de Bogotá.
- Descripción de la metodología utilizada en las medias de campo (técnica, precisión, etc.).
- Estudio de futuras adquisiciones de datos ENVISAT y ALOS para la monitorización continua de la zona. A falta de confirmación, podría ser posible la obtención de imágenes cada 17 días lo que permitiría una mayor frecuencia temporal en épocas críticas.
- Comparación con los datos de nivelación contemplados en el cronograma inicial del proyecto.