EL PAPEL DE LAS TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES EN LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO. LECCIONES APRENDIDAS DE TERREMOTOS RECIENTES

Belén Benito Oterino

CIGeo
Primer Congreso en Ingeniería Geomática.
Valencia

Índice

1. Conceptos de peligrosidad y riesgo sísmico

2. TIGs en gestión de riesgos

3. Aplicaciones de los SIG en peligrosidad y riesgo

4. Aplicaciones de TELEDETECCIÓN e INSAR

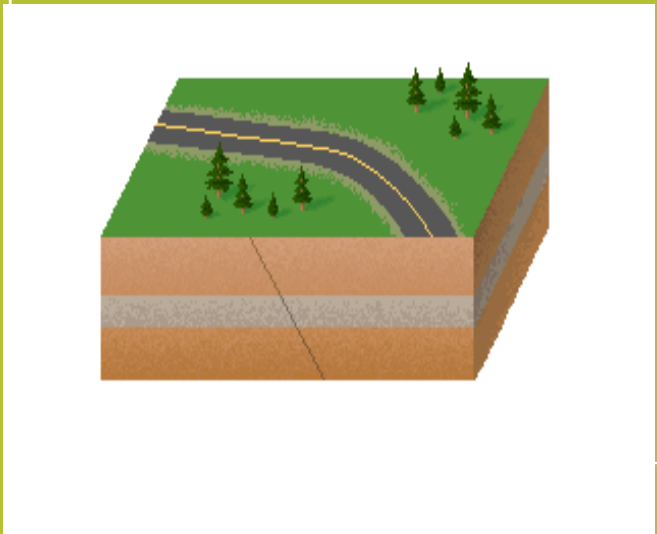
5. Aplicaciones GPS

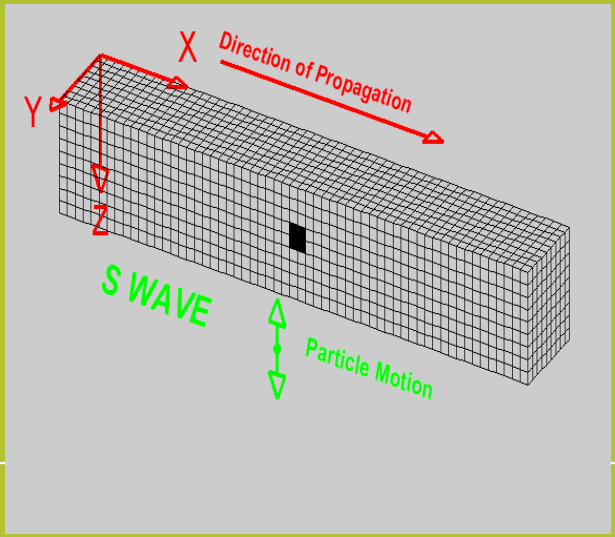
6. Otras aplicaciones

7. Conclusiones

1. Conceptos de amenaza (o peligrosidad) y riesgo sísmico

Secuencia completa de generación de un terremoto

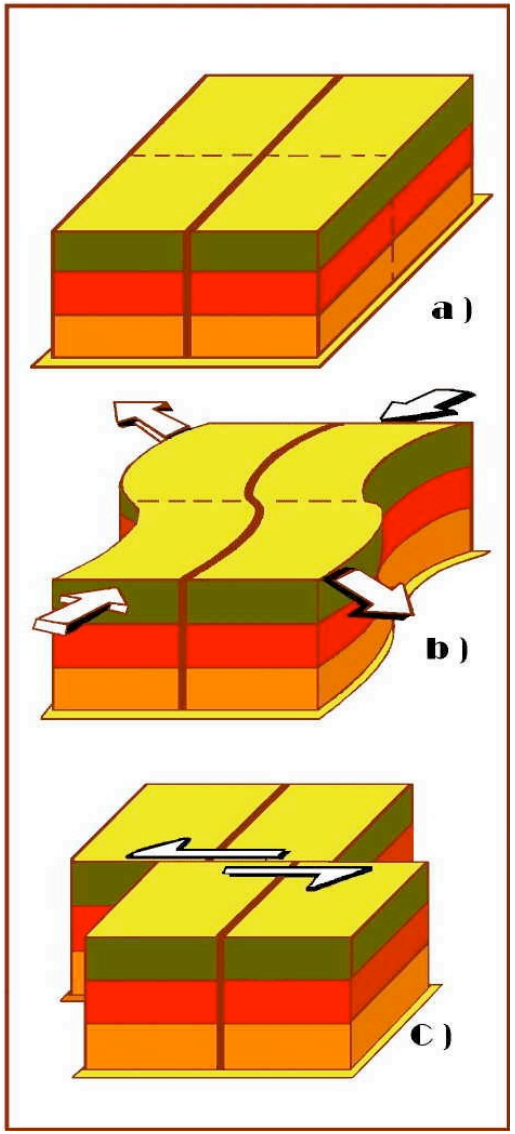




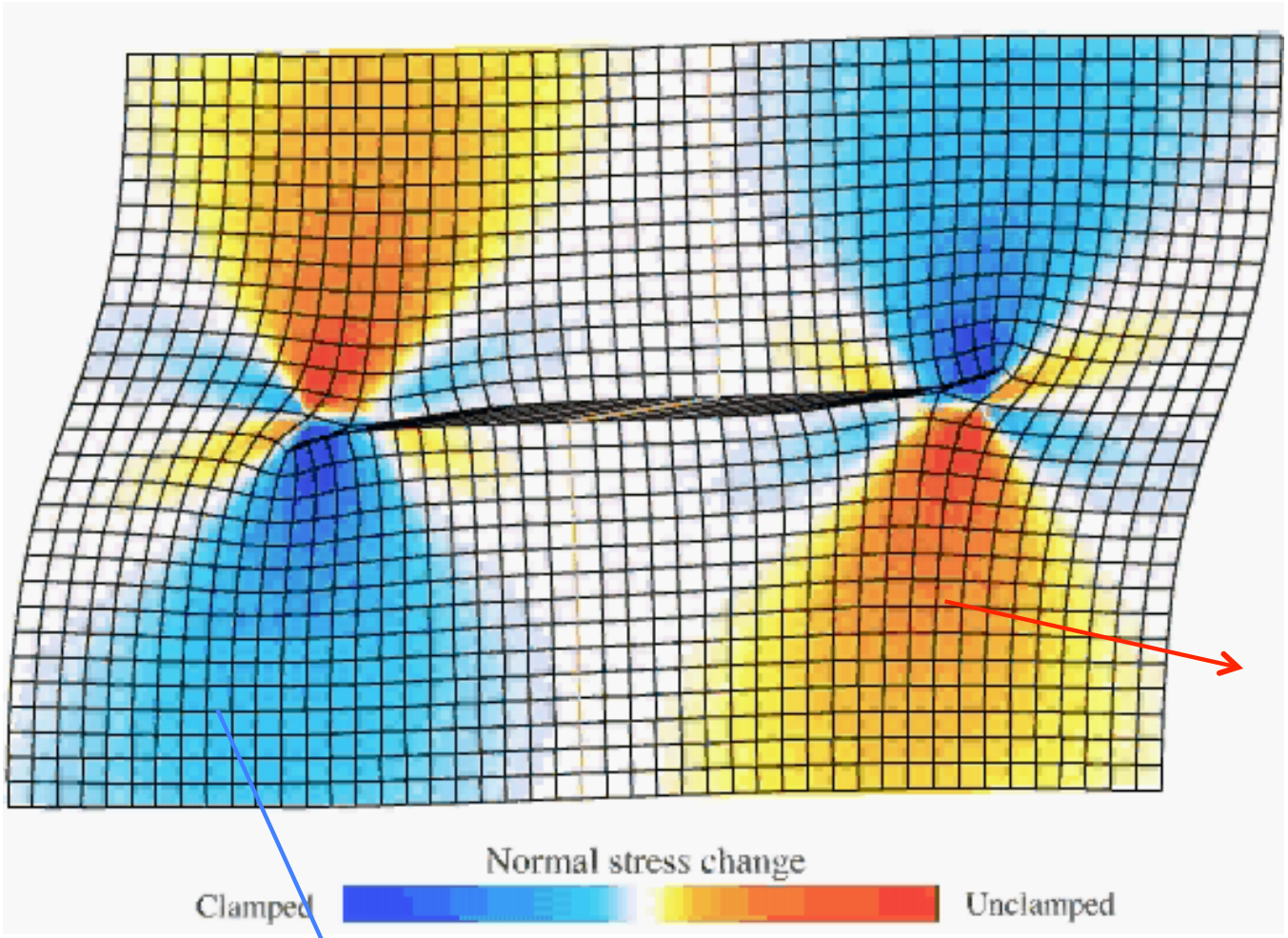
Liberación de energía producida por la relajación brusca de los esfuerzos acumulados previamente en un plano de falla

Teoría del Rebote Elástico (Reid 1910)

Debido a las fuerzas que actúan sobre la corteza, ésta se deforma, acumulando esfuerzo dentro de las rocas. Cuando el esfuerzo alcanza la máxima resistencia del material, provoca la ruptura y los dos lados de la fractura rebotan hacia posiciones de menor esfuerzo. En el proceso se libera una energía que se propaga, en parte, en forma de ondas elásticas



Transferencia de esfuerzos de Coulomb



Tras la el plano de falla queda libre de esfuerzos, pero estos se propagan hacia otras zonas pudiendo disparar nuevos eventos

Zonas cargadas

Estas zonas son favorables a la ocurrencia de nuevos sismos

Zonas descarcargadas

SOLUCIONES PARA MITIGAR EL DAÑO

Alternativas a la predicción a corto plazo:

1

- Evaluación de la **PELIGROSIDAD SÍSMICA** (Predicción del **MOVIMIENTO** a mediano y largo plazo)
  - Diseño sismorresistente
  - Planificación urbanística

2

- Evaluación del **RIESGO SÍSMICO** (predicción de **PÉRDIDAS** ante movimientos futuros
  - Planes de emergencias
  - Reforzamiento, planificación urbanística, etc.

1 Conceptos sobre amenaza y riesgo sísmico

PELIGROSIDAD SÍSMICA (predicción a largo plazo)

1 **Probabilidad de que se excedan movimientos sísmicos de cierta intensidad en una zona durante un periodo de tiempo definido**

→ Movimiento esperado en *t* años

→ No interviene la respuesta de la estructura

→ Información necesaria:

- Geología y tectónica del área de influencia
- Sismicidad
- Características del medio de propagación de las ondas

} Problema Geológico y Sísmico

1 Conceptos sobre amenaza y riesgo sísmico

2 **RIESGO SÍSMICO = Probabilidad de un evento × Pérdidas asociadas al evento**

Peligrosidad * Vulnerabilidad * exposición * coste

- Peligrosidad: Movimiento esperado con cierta probabilidad durante tiempo t
- Vulnerabilidad: capacidad de daño de la estructura ante cierto movimiento
- Exposición: densidad de población y/o de edificios en la zona
- Coste: Valor económico de la reparación de daños

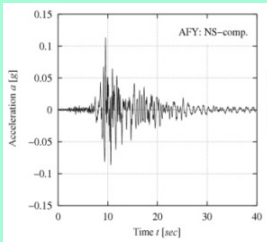
La vulnerabilidad se puede reducir

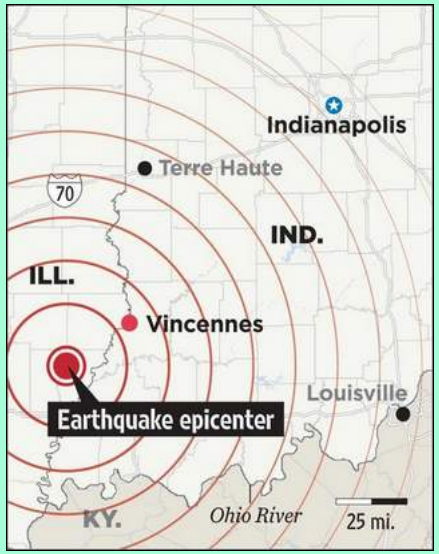
→ **El riesgo se puede controlar**

Estudios de Riesgo: Visión General

Peligrosidad

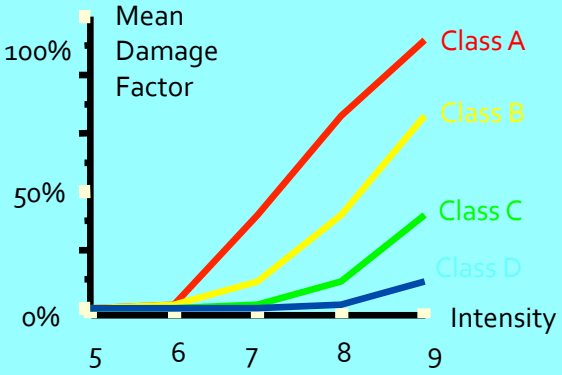
Amenaza





X

Vulnerabilidad



Edificios – Población -Economía

=

Riesgo

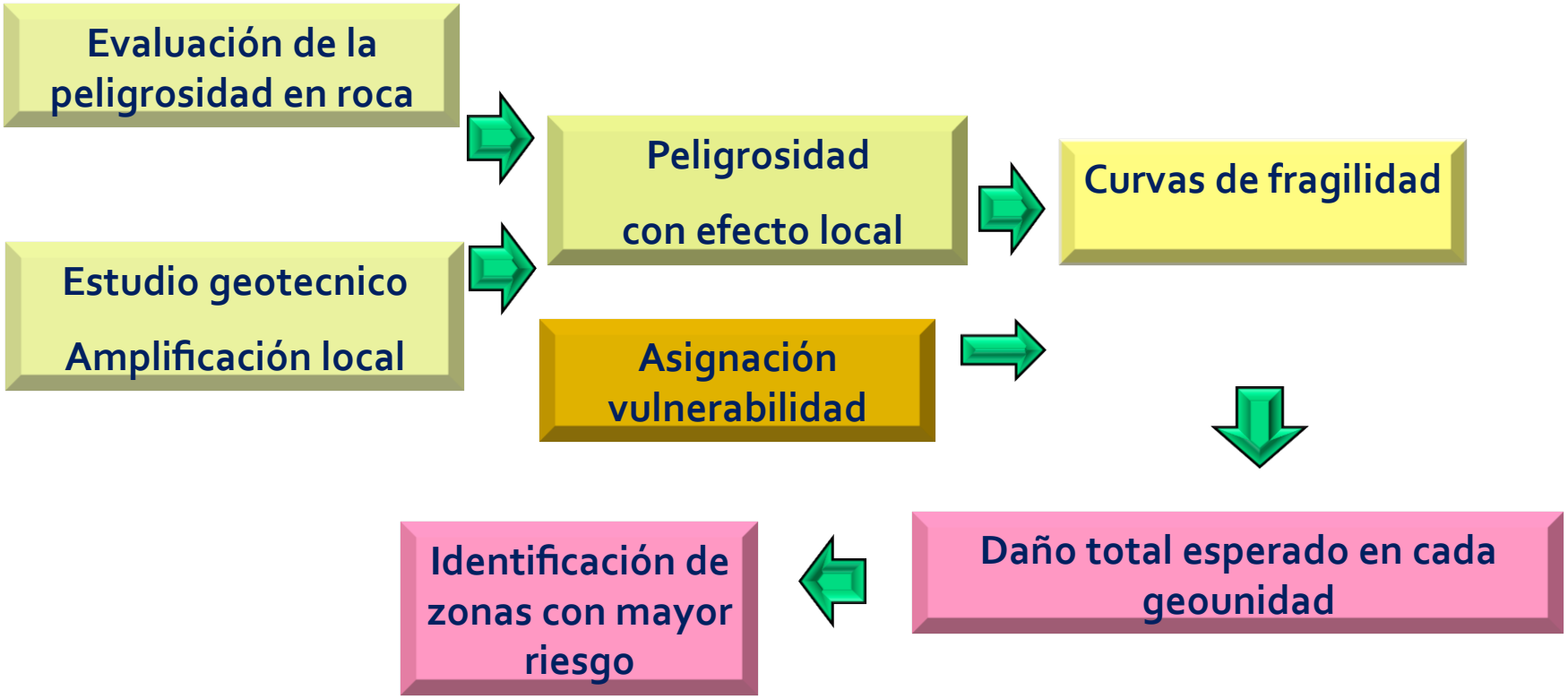
Daños

+ pérdidas económicas €

+ pérdidas humanas ✚

Evaluación del riesgo sísmico

Secuencia de actuación



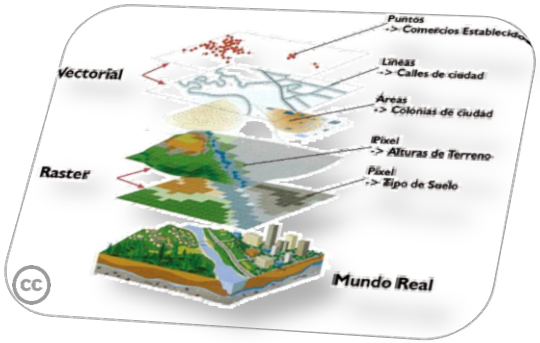
Planificación urbanística, definición de planes de emergencia y medidas de mitigación del riesgo

2. TIGs en la Gestión del riesgo

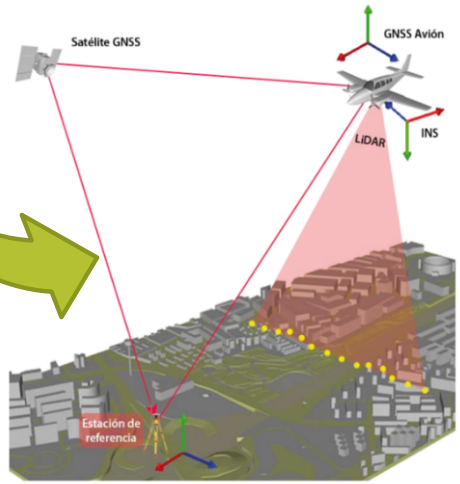
2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

¿Qué son las Tecnologías de Información Geográfica (TIGs)?

Técnicas, aplicaciones, sistemas y recursos orientados a la captura, tratamiento y análisis de la **realidad geográfica**



SIG
GNSS
Fotogrametría
Lidar
Teledetección
Sistemas basados en localización
…

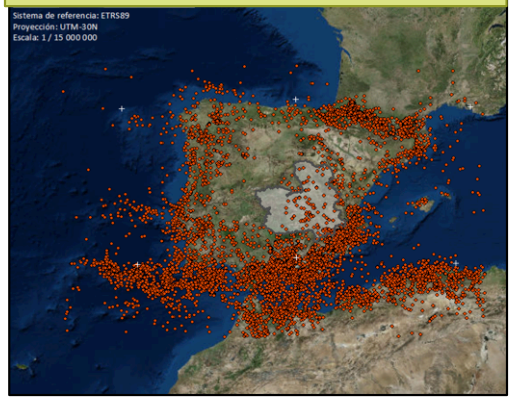


JJ Arranz

2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

¿Qué nos permiten las TIGs?

GEORREFERENCIAR EVENTOS



Elaboración propia

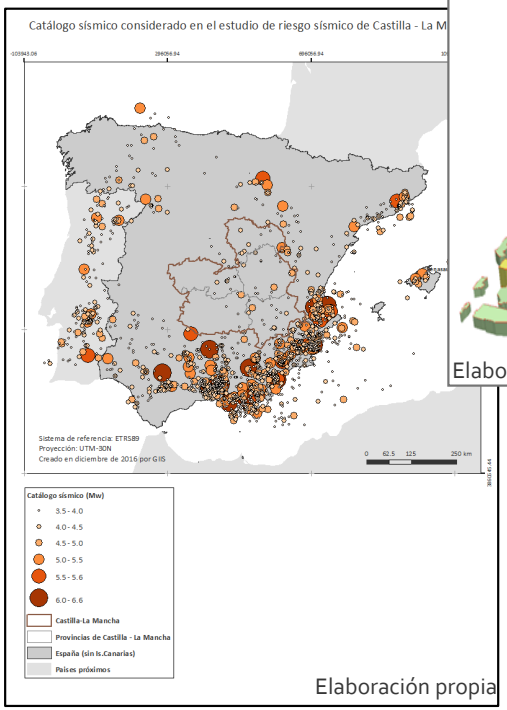
GESTIÓN DE RECURSOS

CONOCER EN DETALLE EL ESTADO DE UNA REGIÓN

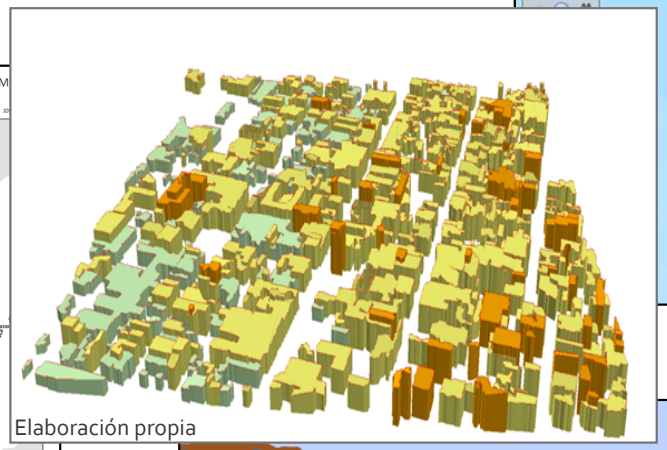
2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

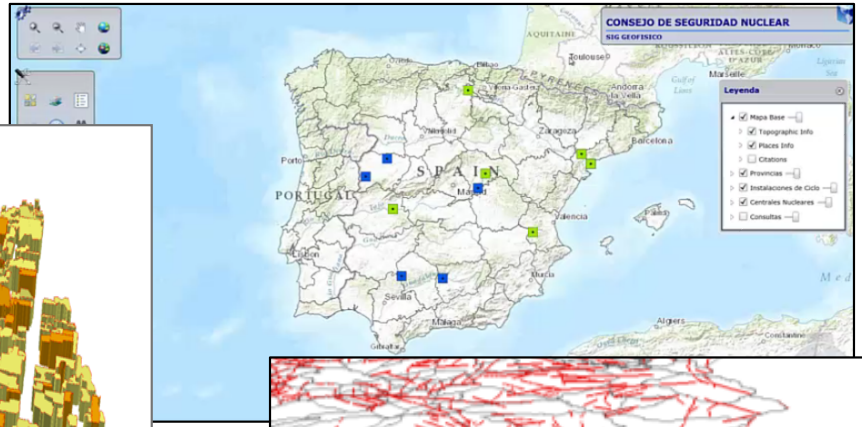
SIG Y VISUALIZADORES

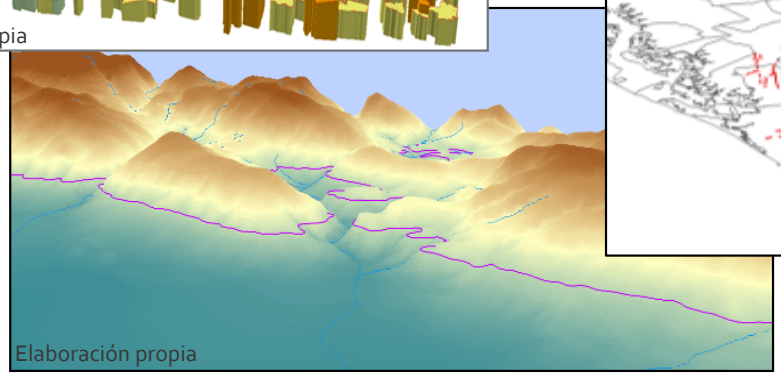
- Gestión de la BBDD
- Integración y edición de información de diversas fuentes
- Análisis espacial y temporal
- Creación de mapas con resultados
- Difusión de información
- Etc.

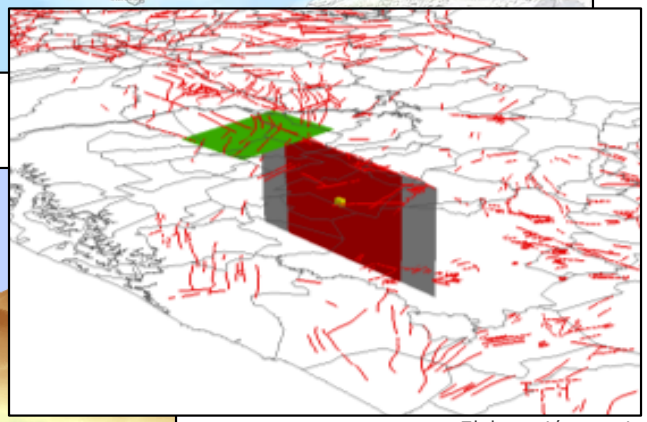


Elaboración propia


Elaboración propia



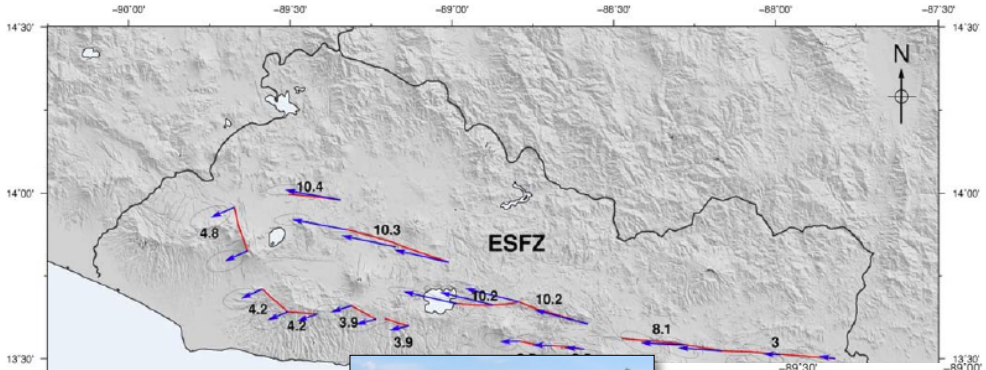

Elaboración propia


Elaboración propia

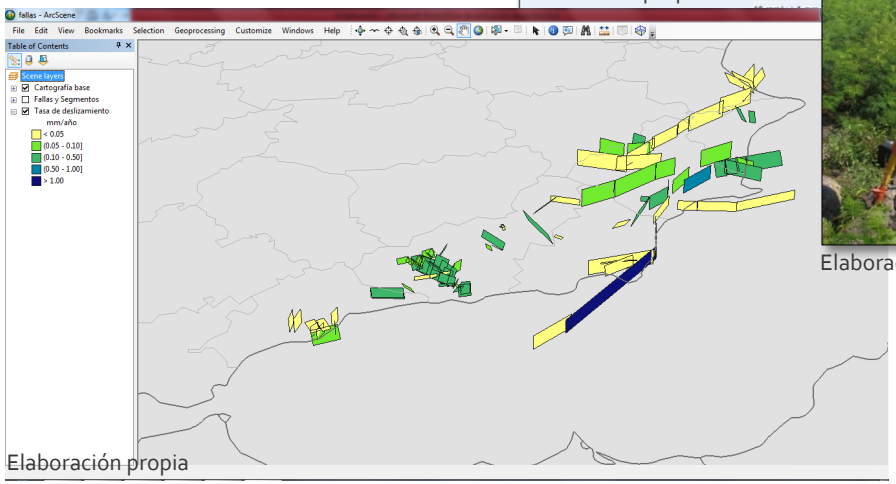
2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

GNSS

- Modelización de fallas
- Tasas de deformaciones
- Levantamientos topográficos tras eventos sísmicos → Navegadores de mano

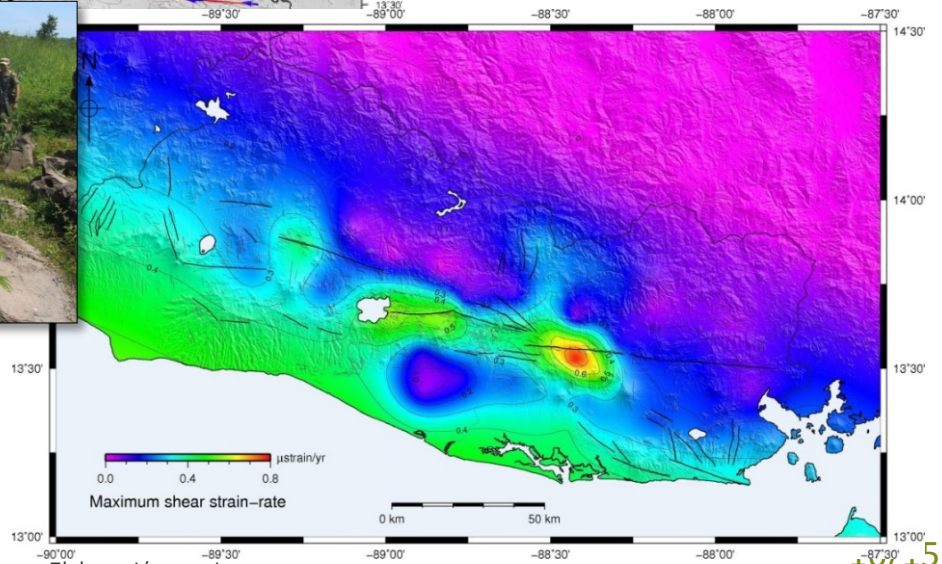


Elaboración propia



Elaboración propia

Elaboración propia



Elaboración propia

2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

Fotogrametría y LIDAR

- Imágenes cercanas y aéreas de la zona de estudio
- Fuente de información digital casi en tiempo real
- Establecimiento de planes de emergencia y planes de ayuda humanitaria

2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

Teledetección

- Realización de inventarios para definir la vulnerabilidad de los elementos expuestos
- Control de cambios
- Seguimiento de fenómenos naturales
- Análisis de daños tras un evento

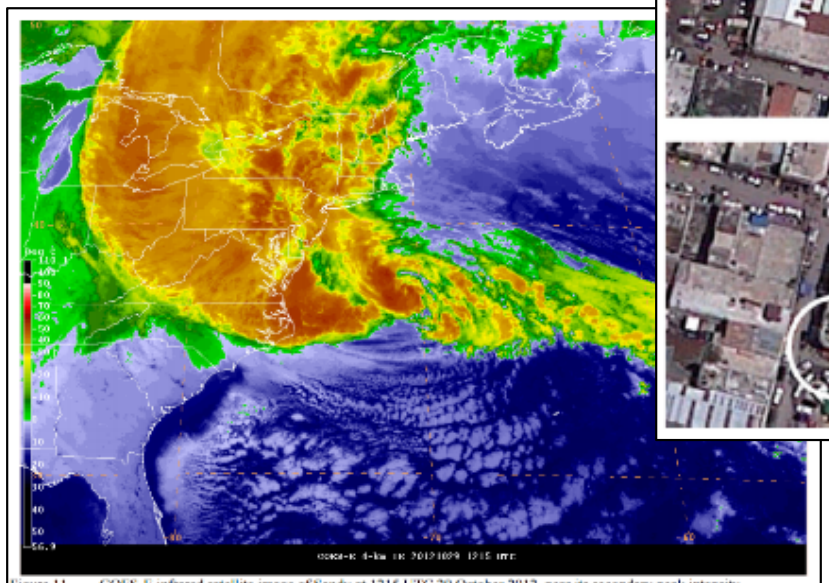
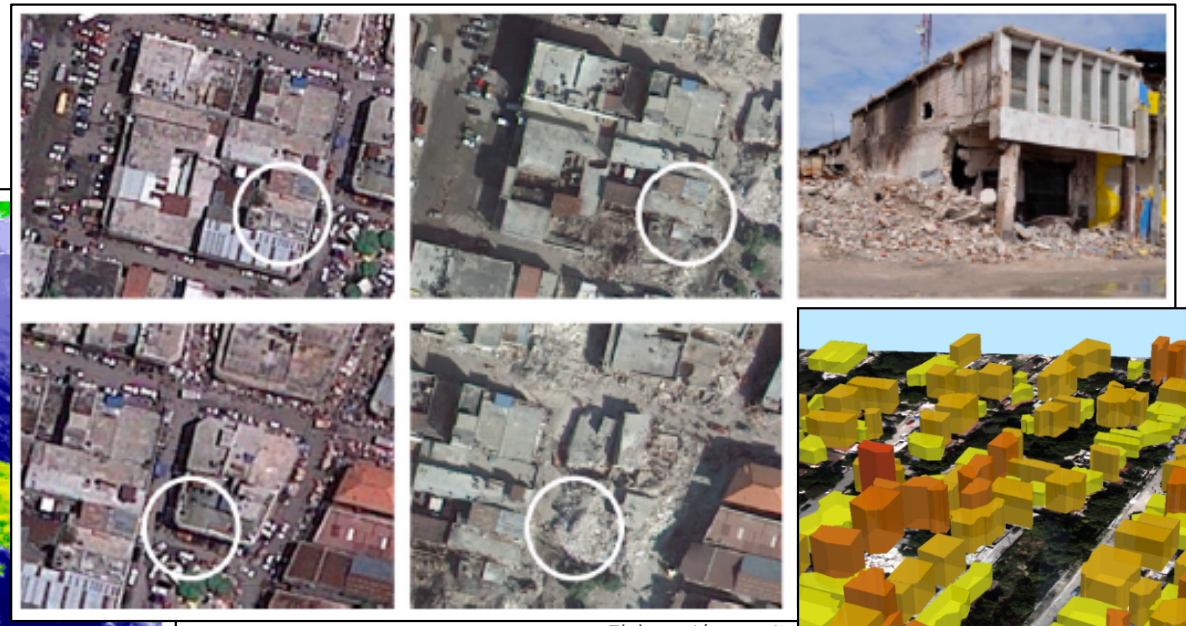


Figure 11. GOES-E infrared satellite image of Sandy at 1215 UTC 29 October 2012, near its secondary peak intensity.



Elaboración propia

2 TIGs en la gestión del riesgo sísmico

Sistemas basados en localización

- “I am OK” (Google)
- “Are you OK? (SGE)
- FLOODMAP
- FLOOD PATROL
- NATURAL DISASTER MONITOR
- DISASTER ALERT
- …

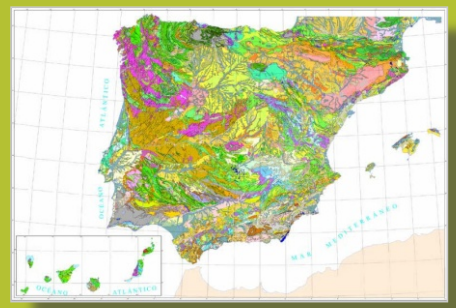
ShakeAlert

3. Aplicaciones de los SIG

3 Aplicaciones de los SIG

Evaluación de la peligrosidad sísmica
Metodo PSHA

Tectónica

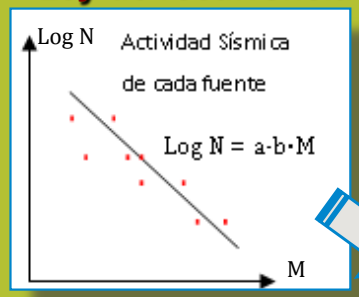


Catálogo Sísmico

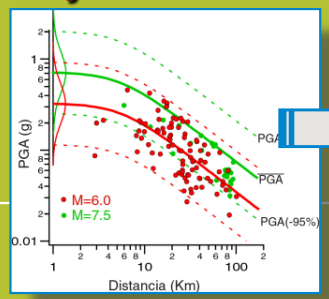
Zonificación

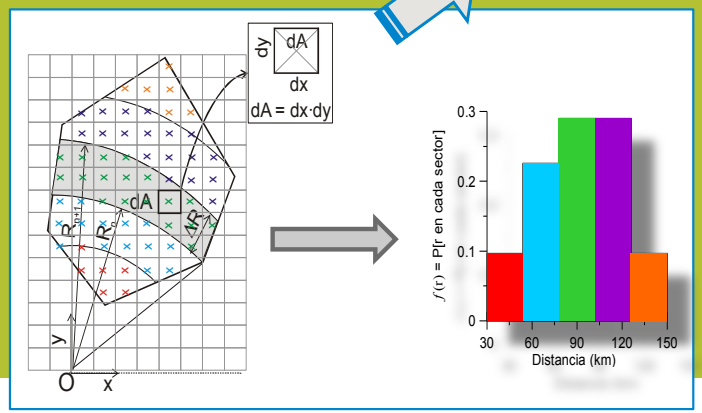
Fuente-emplazamiento

Ley de recurrencia

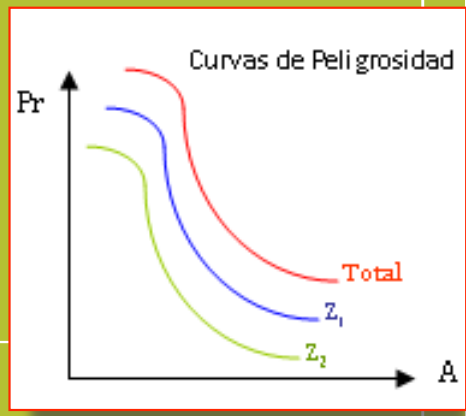


Ley de atenuación





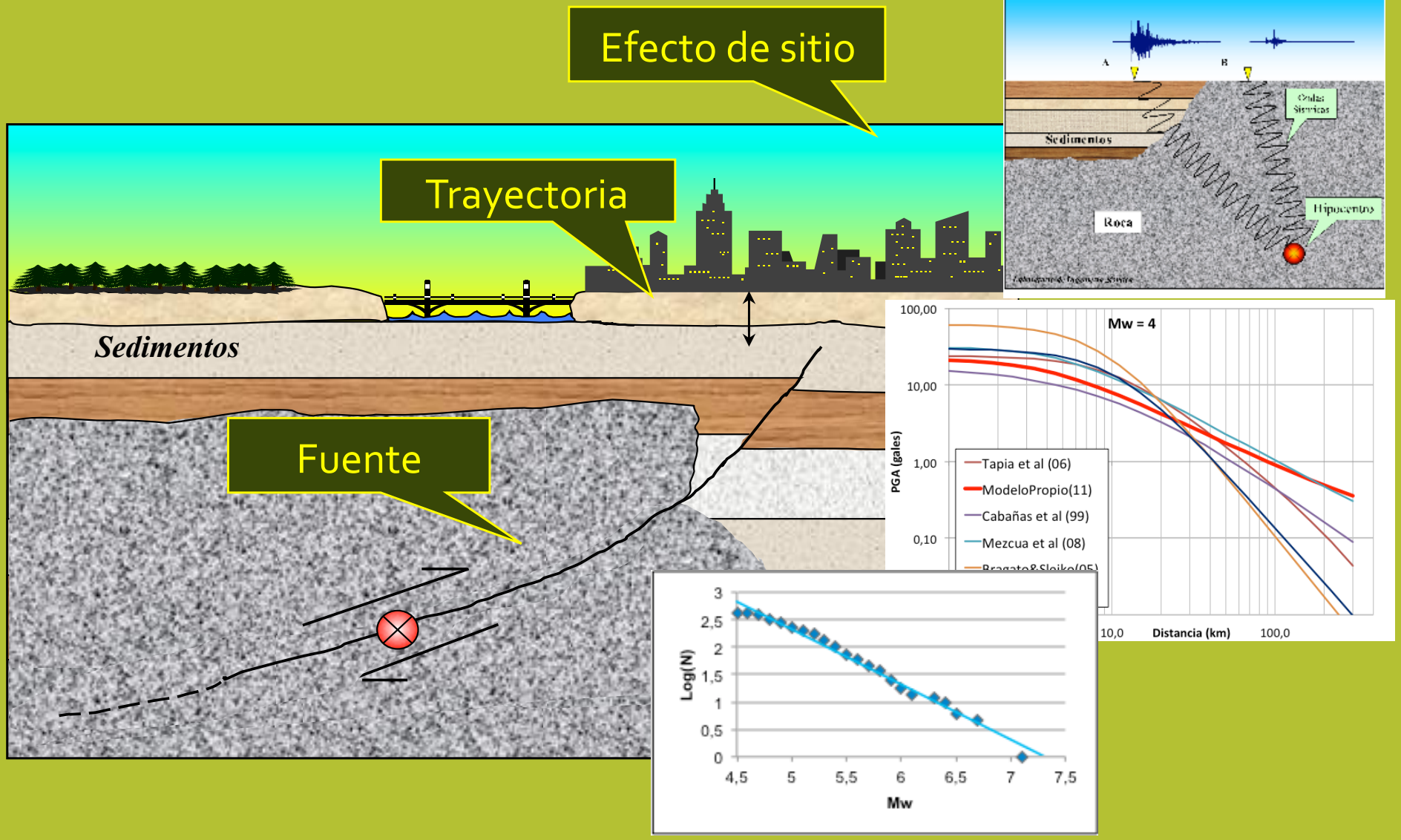
CURVAS DE PELIGROSIDAD



$$\lambda(y > Y) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i(y > Y) = \sum_{i=1}^{N} v_i \iiint P_i\left[y > Y \mid m, r, \varepsilon\right] f_{M\,i}(m)\, f_{Ri}(r)\, f_{\varepsilon i}(\varepsilon)\, dm\, dr\, d\varepsilon$$

3 Aplicaciones de los SIG

EL MOVIMIENTO ES UNA CONVOLUCIÓN DE TRES FACTORES



3 Aplicaciones de los SIG

- LOS SIG SON HERRAMIENTAS ESENCIALES EN EL CALCULO DE LA PELIGROSIDAD SISMICA.

- PERMITEN RELACIONAR CAPAS DE INFORMACIÓN DE DISTINTA PROCEDENCIA PARA INCLUIRLAS EN EL CALCULO DE LA PELIGROSIDAD:

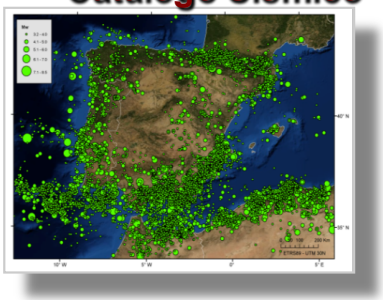
CATALOGO SÍSMICO

MAPAS SISMOTECTONICOS

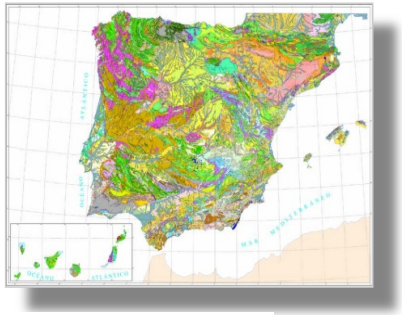
MAPAS GEOTECNICOS

ETC

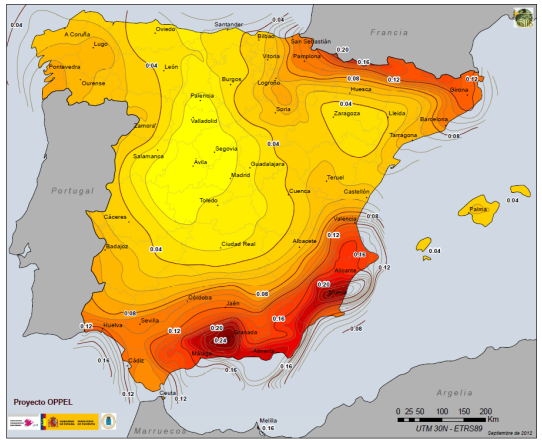
Catálogo Sísmico



Tectónica



Mapa de Peligrosidad Sísmica de España. Valores de PGA en (g). Periodo de Retorno de 500 años

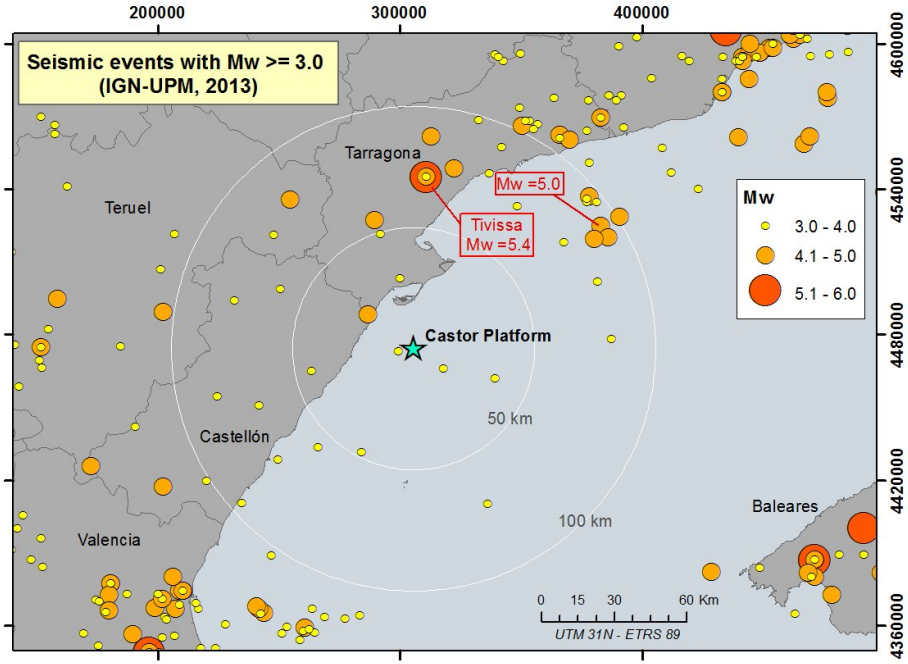


- FACILITAN LA REPRESENTACION DE MAPAS DE PELIGROSIDAD

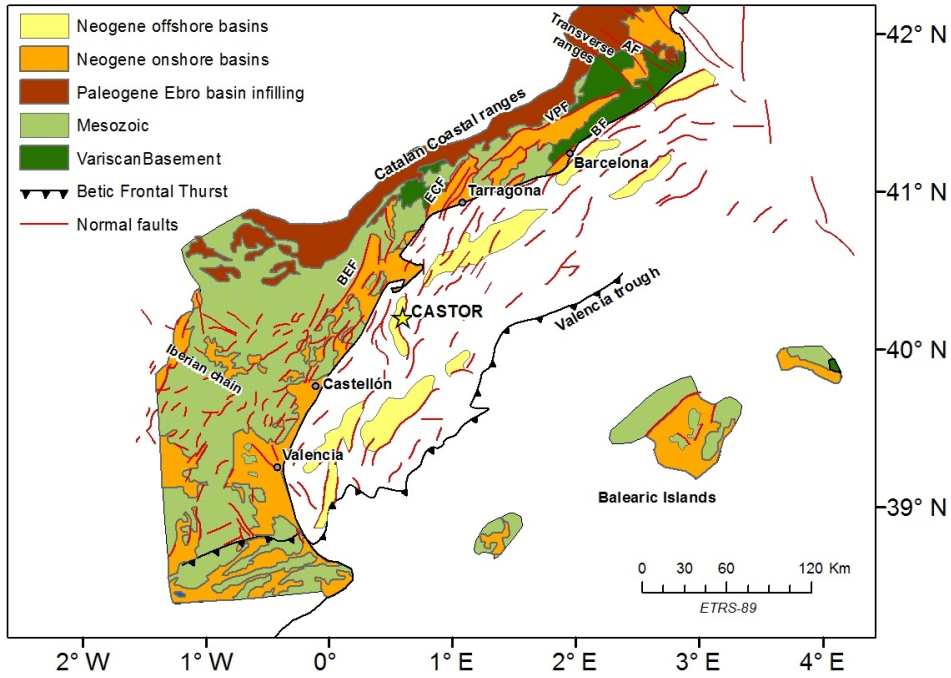
3 Aplicaciones de los SIG

SEGUIMIENTO DE SERIES SISMICAS

Ejemplo: Sismicidad inducida por el proyecto Cástor



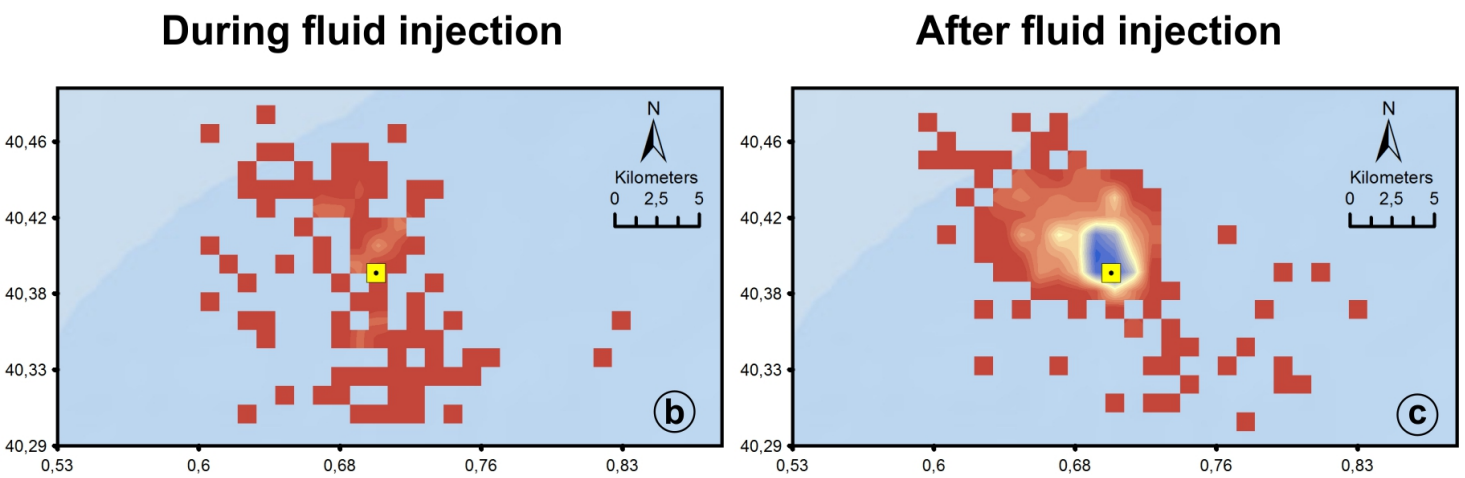
Baja sismicidad previa a la inyección de gas



Sistema de fallas de Amposta

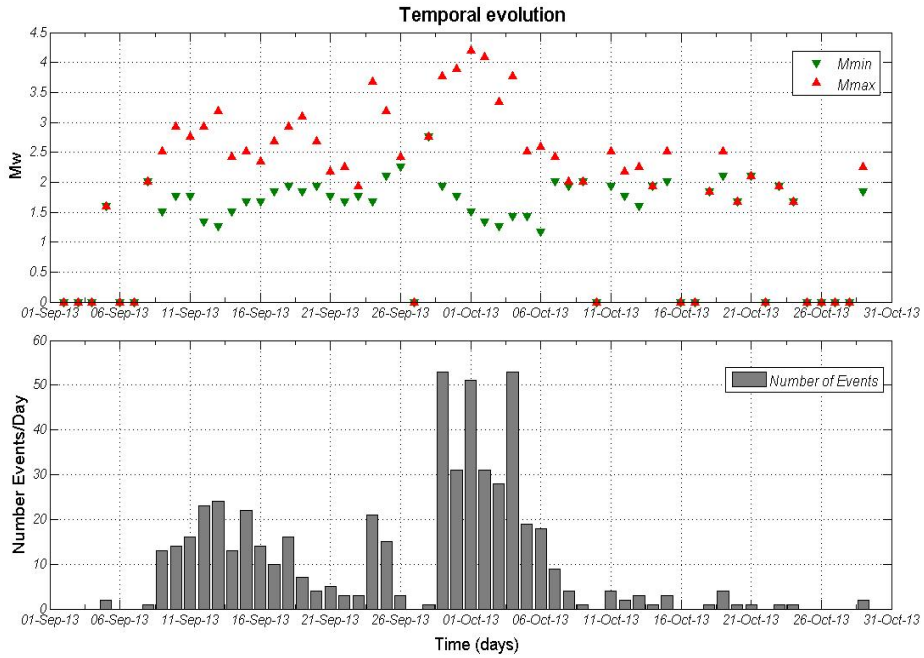
Sismicidad Inducida Proyecto Castor

Representación de la sismicidad por ventanas espacio-temporales



3 Aplicaciones de los SIG

Sismicidad antes, durante y después de la inyección

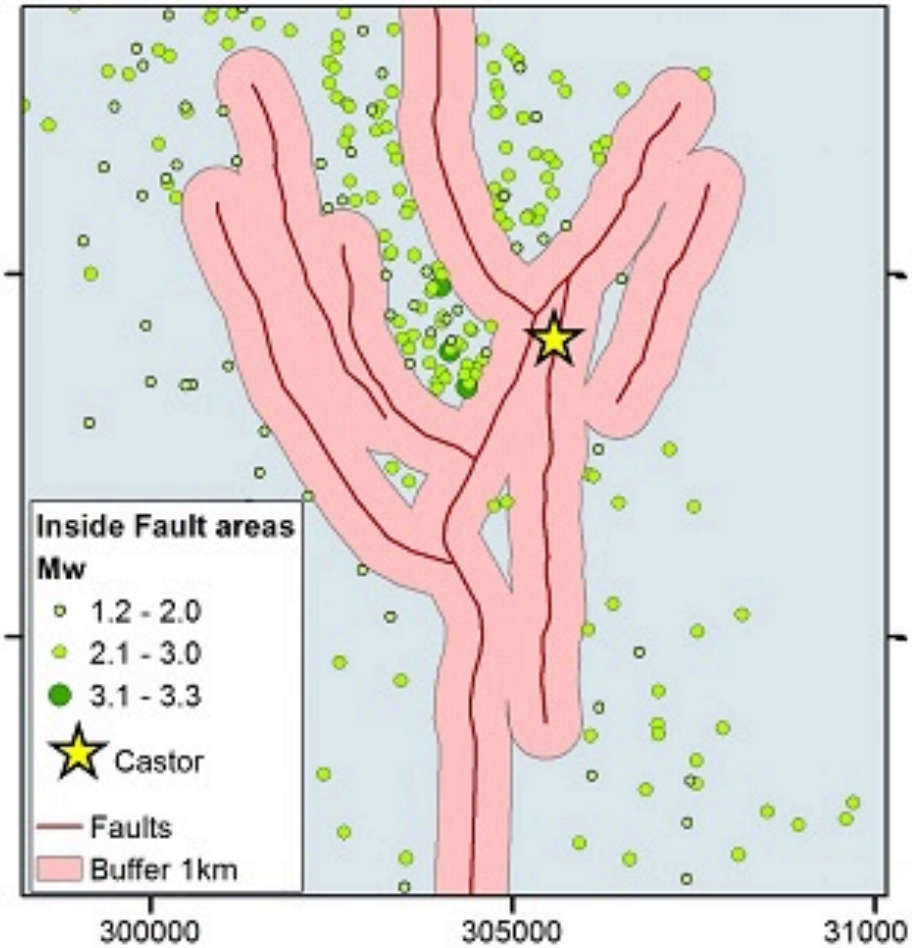


El análisis estadístico realizado ha proporcionado evidencias de cambios en el patrón de sismicidad antes y después de la inyección,

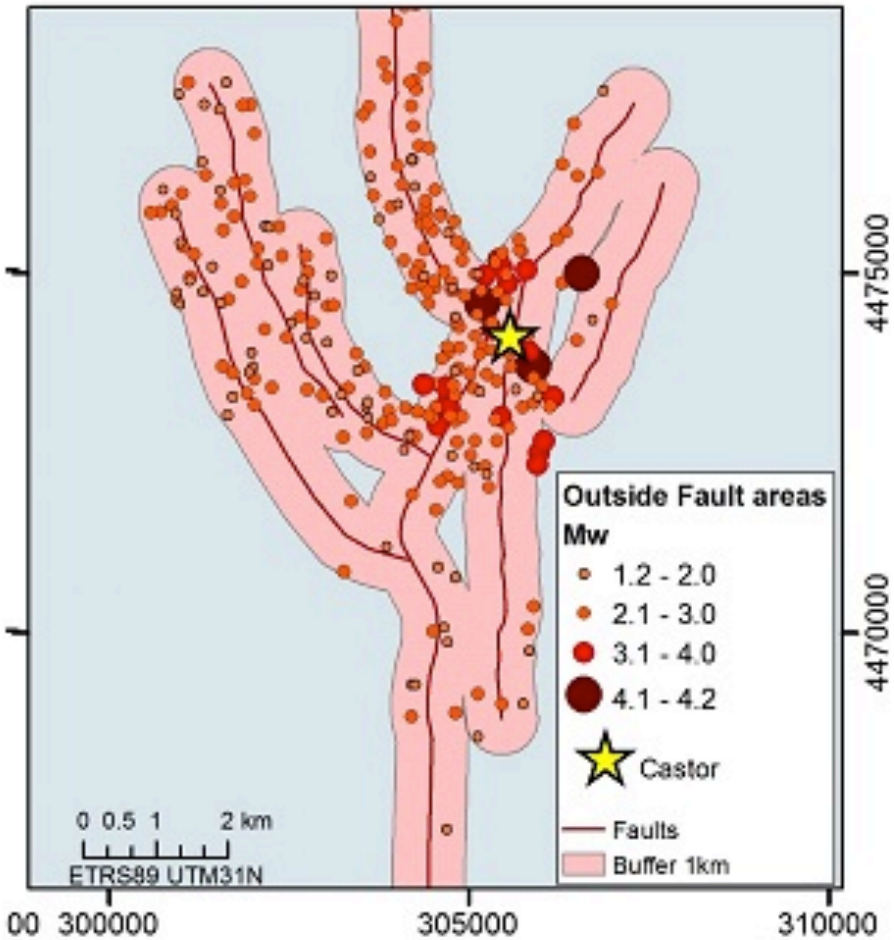
- La primera parte de la serie sísmica esta directamente relacionada con los esfuerzos inducidos por las operaciones de inyección en la plataforma Castor (sismicidad inducida),
- La segunda parte de la serie se asocia a la posible activación de una falla próxima debido a los cambios de esfuerzos locales como consecuencia del aumento de la presión de poros (sismicidad disparada).

3 Aplicaciones de los SIG

Sismicidad Inducida y disparada por el Proyecto Castor



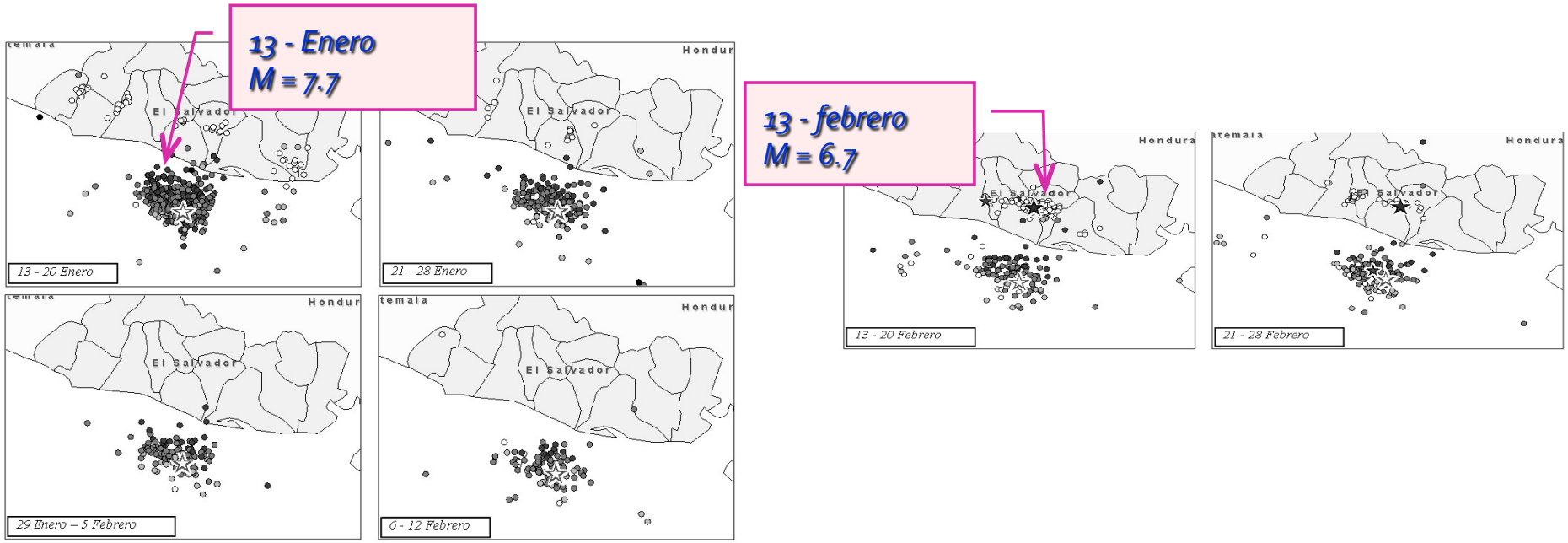
Sismicidad inducida



Sismicidad disparada asociada al sistema de fallas

Estudio de la sismicidad de El Salvador en el año 2001

- **13 Enero 2001: Origen de Subducción (M=7.8)**
- **13 Febrero 2001: Origen de Cadena Volcánica (M=6.5)**



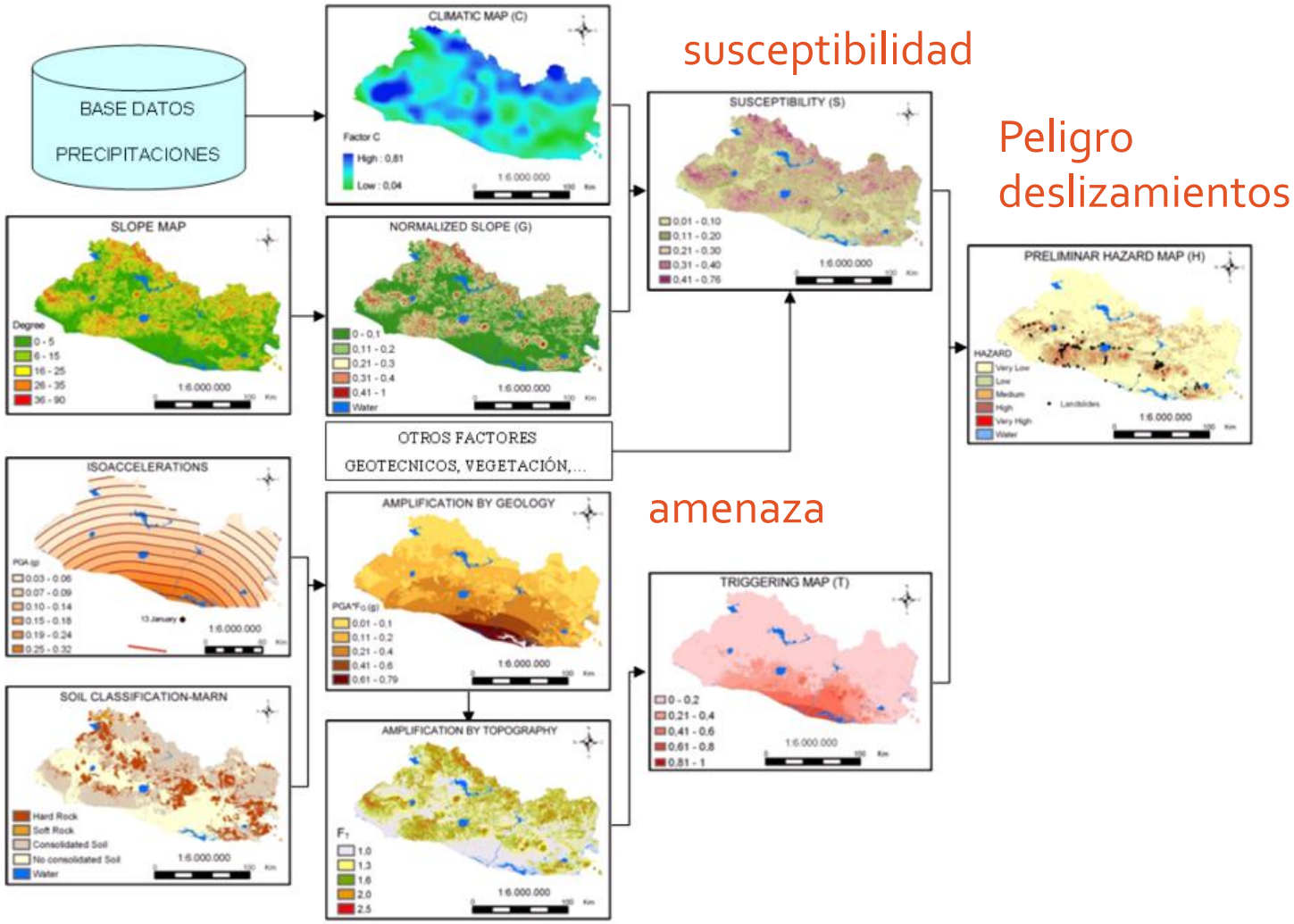
¿Hubo interacción de replicas entre subduccion y cadena volcánica?

PELIGRO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS

Deslizamiento de Las Colinas de Santa Tecla, por el terremoto del 13 de enero de 2001 en El Salvador

600 victimas mortales

Combinación de mapas de distinta procedencia para estimar el peligro de deslizamientos



Mapas de relieve,

litología,

Humedad,

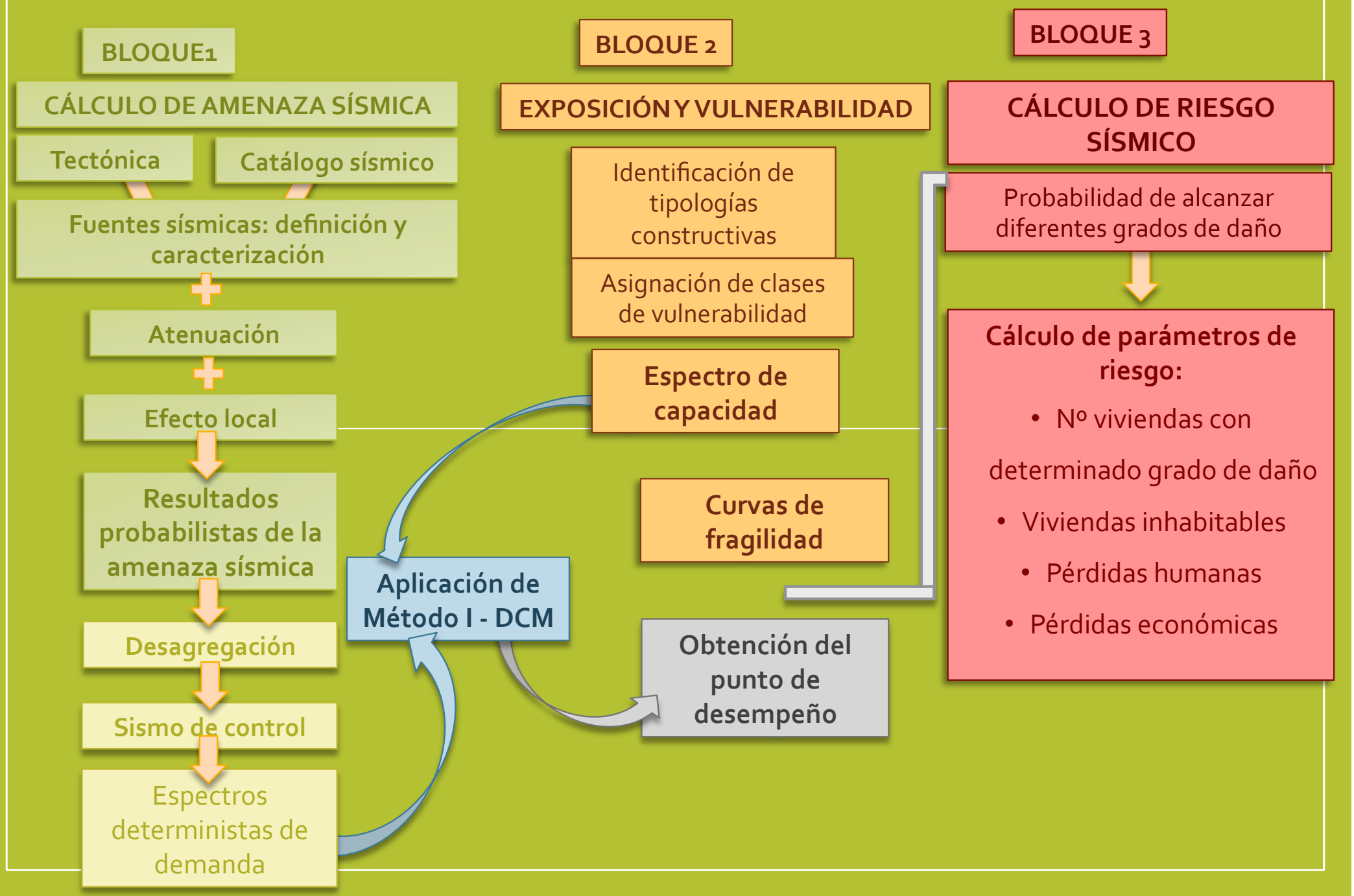
MDT,

peligrosidad

Otras técnicasTécnicas para la Evaluación de Deslizamientos

- **Teledeteccción**
  - **LANDSAT (resolución 30 m)**
  - **SPOT (resolución 10 m)**
  - **IKONOS (resolución 1 m)**
- **Laser Scanning Terrestre**
- **LIDAR (Light Detection and Ranging)**
- **Técnicas Interferometría Radar (INSAR)**
- **GPS – Monitoreo de Deslizamientos**

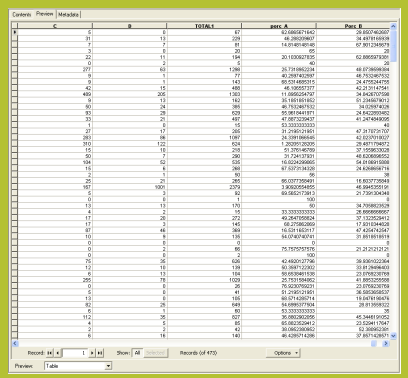
Calculo del riesgo sísmico



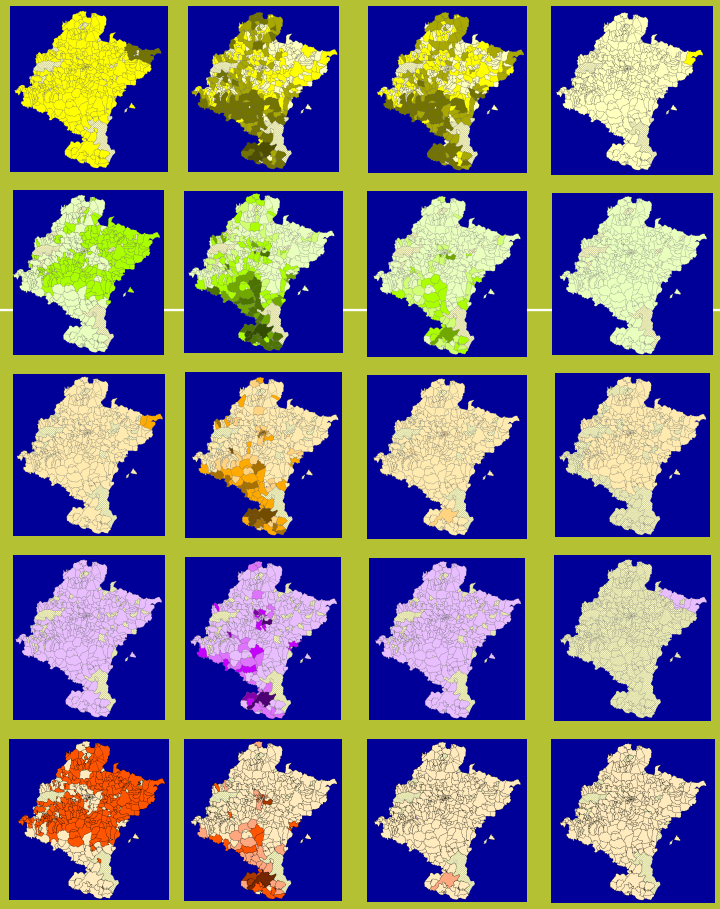
Ej: Riesgo sísmico en Navarra (Proyecto RISNA) para Plan de emergencias de Protección Civil

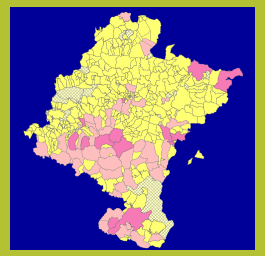
ANÁLISIS Y PROCESOS

RIESGO SÍSMICO



C	B	TOTAL1	perc_A	Perc_B
0	0	67	62.686567164	26.6507463687
31	13	229	48.28009607	34.4976149918
1	7	81	14.8148148148	67.9012345679
3	8	20	15	25
22	11	194	20.1030927835	62.8865979381
0	0	1	0	0
177	62	1396	35.7316862234	48.0734669484
9	1	27	40.2597402597	46.7532467532
9	1	143	60.5314685315	24.4755244755
42	15	488	46.10655737	42.2131147541
489	266	1303	11.6665224767	34.9428370598
9	13	162	35.1851851852	51.2345679012
90	24	386	46.7616387833	38.5288718328
93	28	523	55.0861244181	24.5422893453
31	21	68	45.5882352941	61.2474849094
0	0	45	53.3333333333	46
27	17	205	31.2195121951	47.3170731707
393	58	1097	24.3391996348	42.5370783637
310	122	624	1.26209128205	28.4871794872
15	18	216	51.3791146758	37.1558539328
50	7	290	31.7241379311	48.6206896552
104	52	535	16.0224299065	54.9158879188
15	6	266	67.5373134328	24.6268656716
0	0	1	100	0
25	21	285	60.0701755963	16.8537779949
187	1300	2379	3.90922654855	46.9945355191
5	2	92	69.6622173913	21.7391304348
0	0	1	100	0
13	13	170	50	34.7058823529
4	2	15	33.3333333333	26.6666666667
11	26	272	46.2647058824	37.1323529412
87	48	145	58.2758620689	37.9310344828
10	9	138	54.0740740741	31.8518518519
0	0	0	0	0
0	2	66	75.7575757576	21.2121212121
0	0	2	100	0
75	36	626	42.4920127796	39.9361022364
12	13	139	50.3597122302	33.9128946403
45	13	159	36.6038461859	21.0755237758
299	78	1029	35.7531394892	41.8952238788
0	0	18	55.5555555556	61.1111111111
5	5	41	31.2195121951	38.5853658537
13	6	116	60.5714285714	19.0476190476
92	26	649	54.6995377164	39.8153598522
0	1	60	53.3333333333	36
112	36	607	36.6862963265	45.3446519052
4	5	85	65.8823529412	23.5294117647
0	0	47	36.0962280963	12.3595505618
0	16	146	46.4285714286	37.5857142857

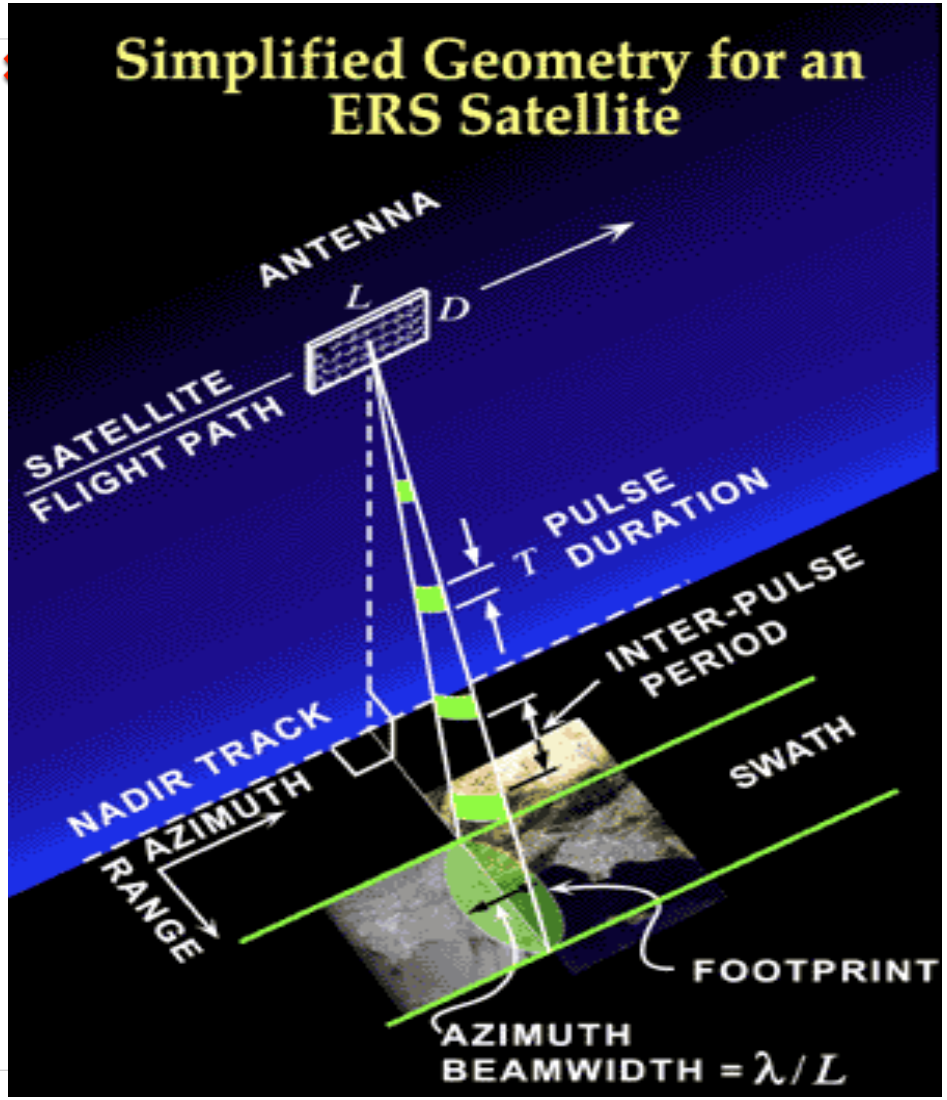


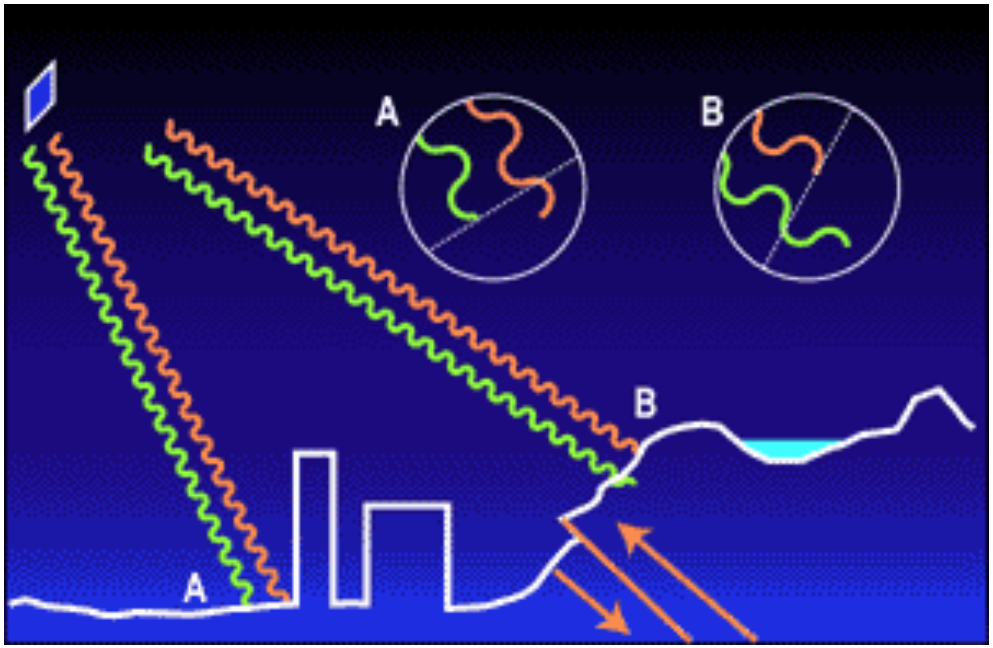


4. APLICACIONES DE TELEDETECCIÓN E INSAR

INTERFEROMETRIA RADAR (INSAR)

- Cuantificación de deformaciones
- Identificación de ciclo sísmico
- Vigilancia de fallas activas
- Fallas Ocultas





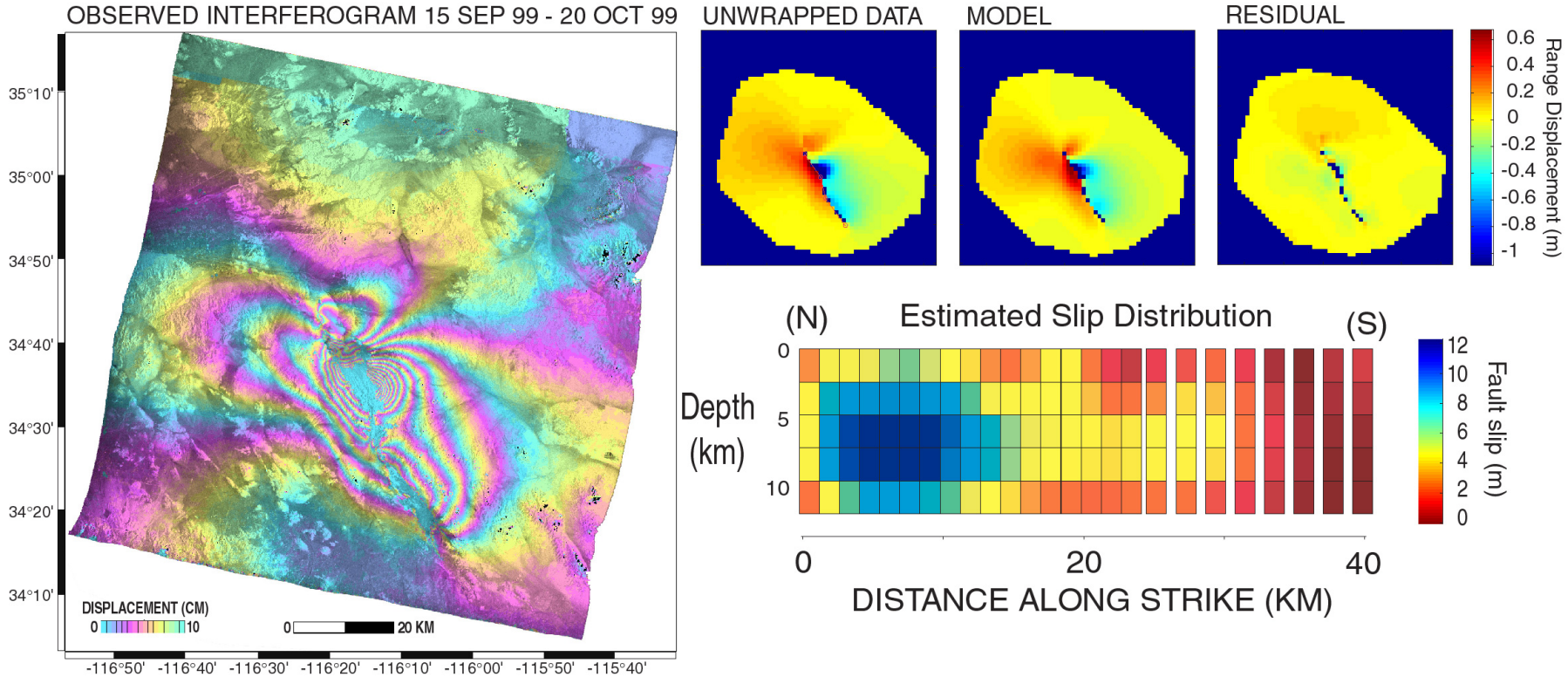
Diferencia de tiempos de ida y vuelta de la onda emitida en dos momentos diferentes, medidos en función de la diferencia de fase

(Cortesía de Martinez-Diaz)

Técnica: comparación de fase de dos imágenes radar tomadas antes y después de un terremoto para estimar la deformación asociada

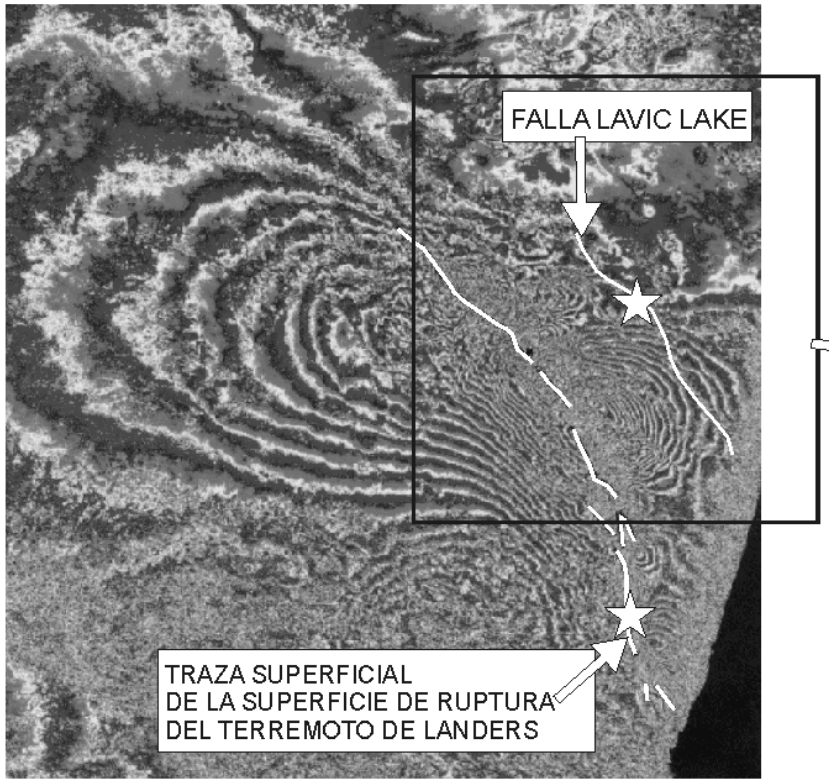
Slip distribution of the 16 Oct 1999 Hector Mine M7.1 earthquake from interferometric radar observations and inverse modeling

H. Zebker, P. Segall, F. Amelung, and S. Jonsson, Department of Geophysics, Stanford University



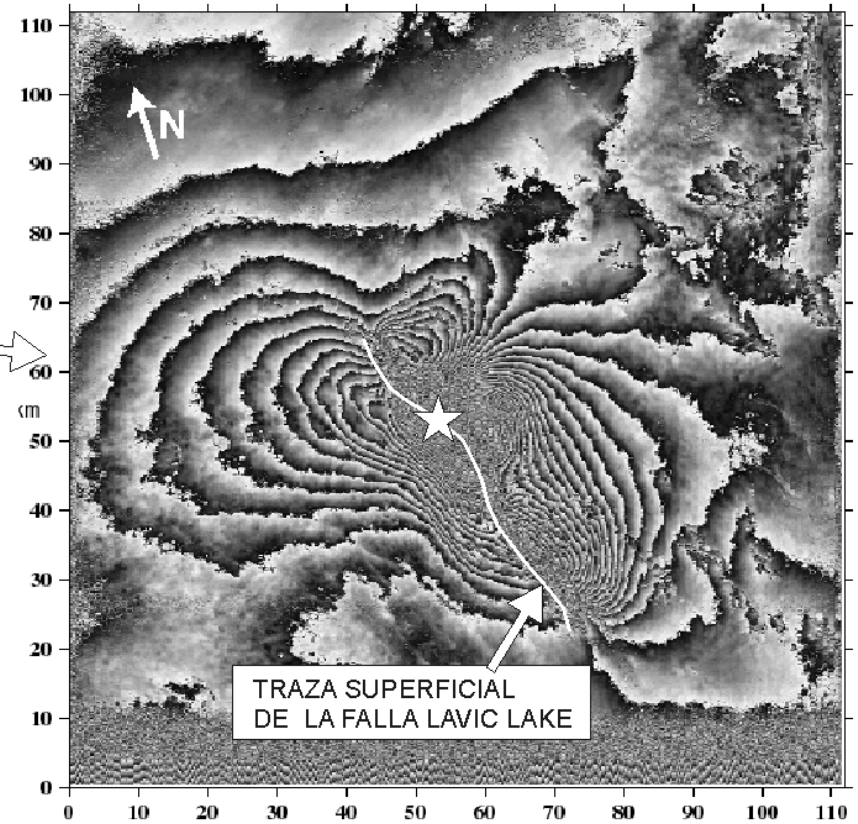
We model the fault geometry using the ground trace provided by the USGS, although the fault trace was extended along strike to the southeast to account for observed fringes in this area. Green's functions were computed for a homogeneous elastic half-space. The inversion minimizes the L-2 norm of the range change residuals as well as the norm of the Laplacian of the slip distribution. Solutions fit the data reasonably well, without causing the slip distribution to become highly oscillatory. The estimated seismic moment ranges from 4 to 6 x 10^{19} N-m, corresponding to Mw of approximately 7.1 to 7.2. A robust feature of the inversion is that slip is asymmetric, with slip concentrated toward the northern end of the fault. This asymmetry is not evident in the surface offsets measured in the field. Some preliminary solutions based on seismic data alone show slip concentrated at the southeastern end of the rupture.

Landers, 1992



Massonnet et al. (1994)

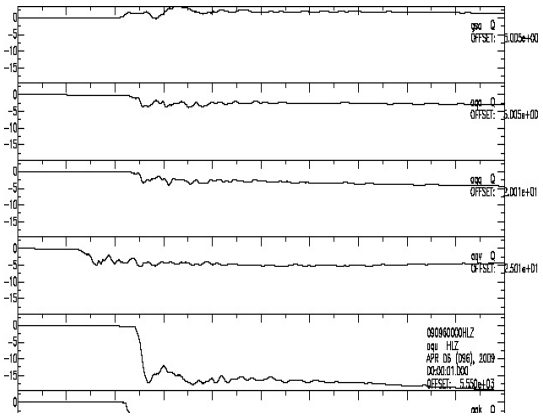
Hector Mine, 1999



Sandwell et al. (2000)

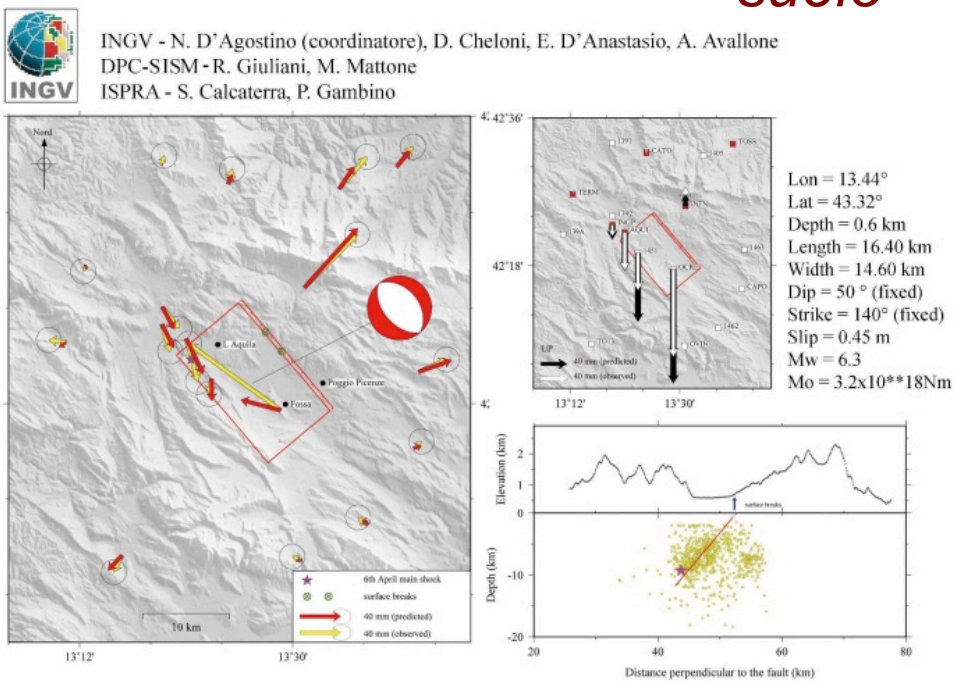
L' Aquila 2009

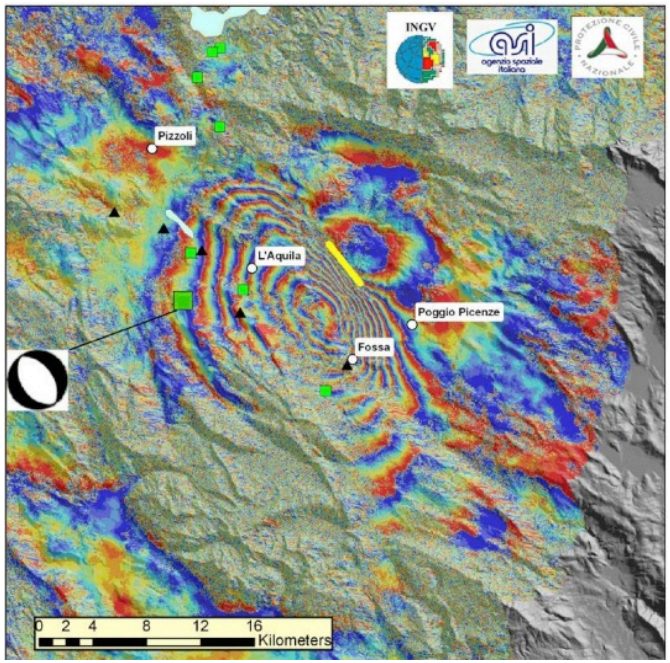
Coherencia con el desplazamiento estimado por GPS y con el interferograma ENVISAT



Filtrando a 2 Hz la componente vertical de AQM se obtiene un desplazamiento indicativo de la deformación permanente del suelo ~ 15 cm

SPOSTAMENTI MISURATI CON GPS

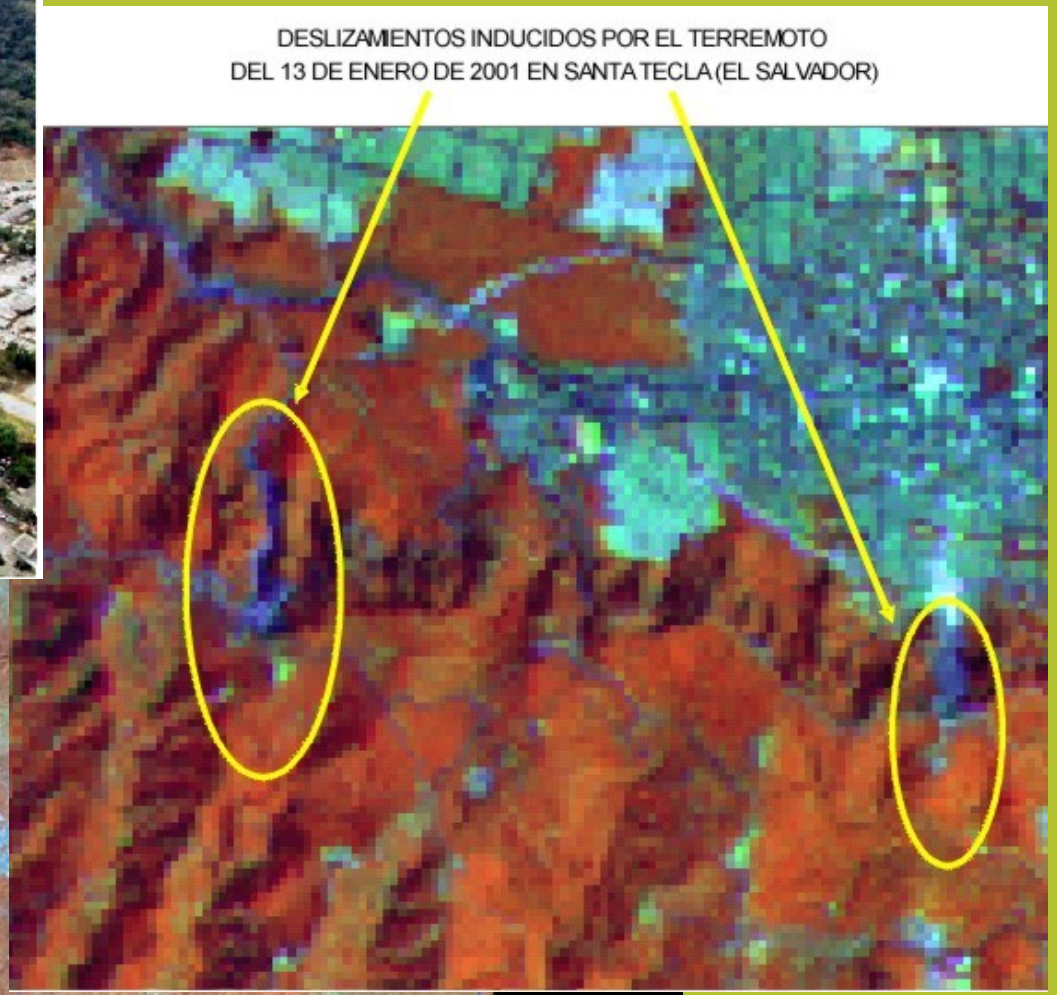


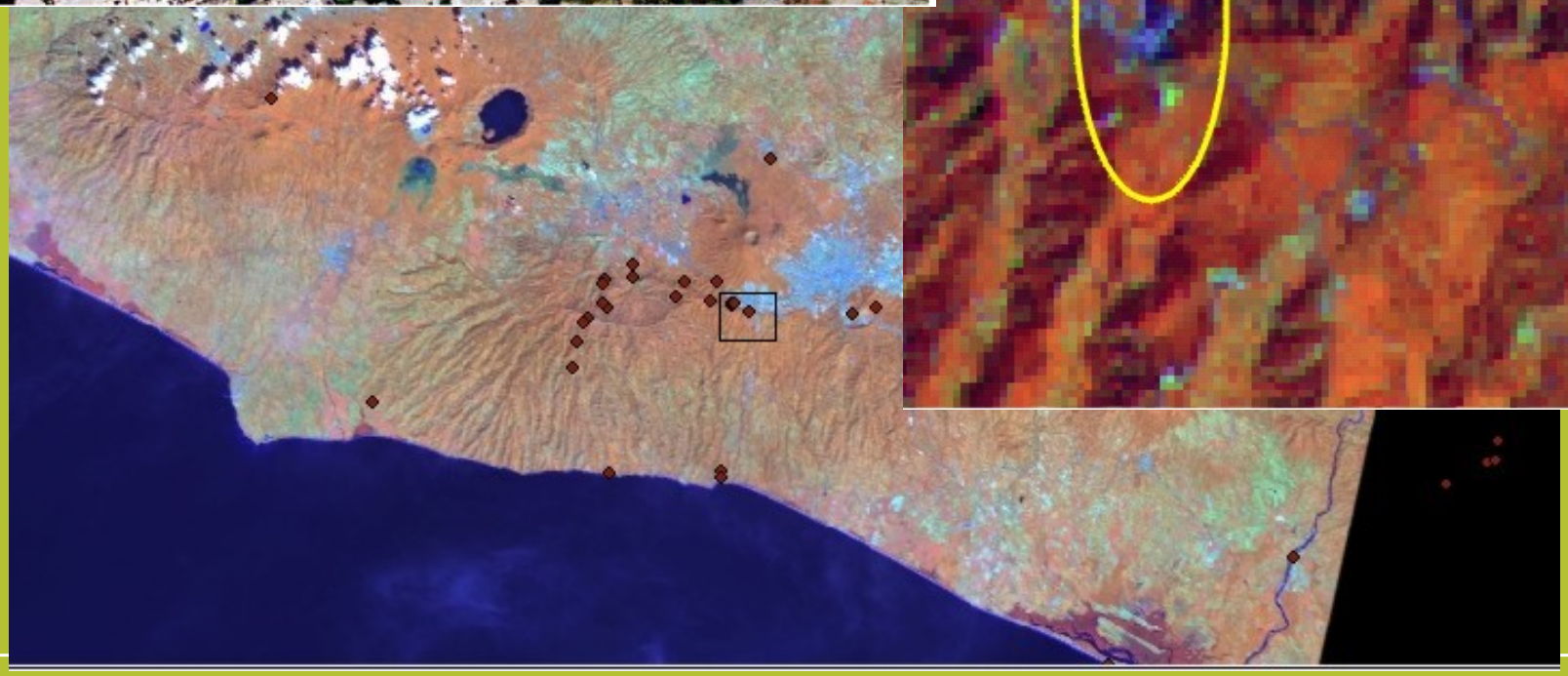


INTERFEROMETRIA

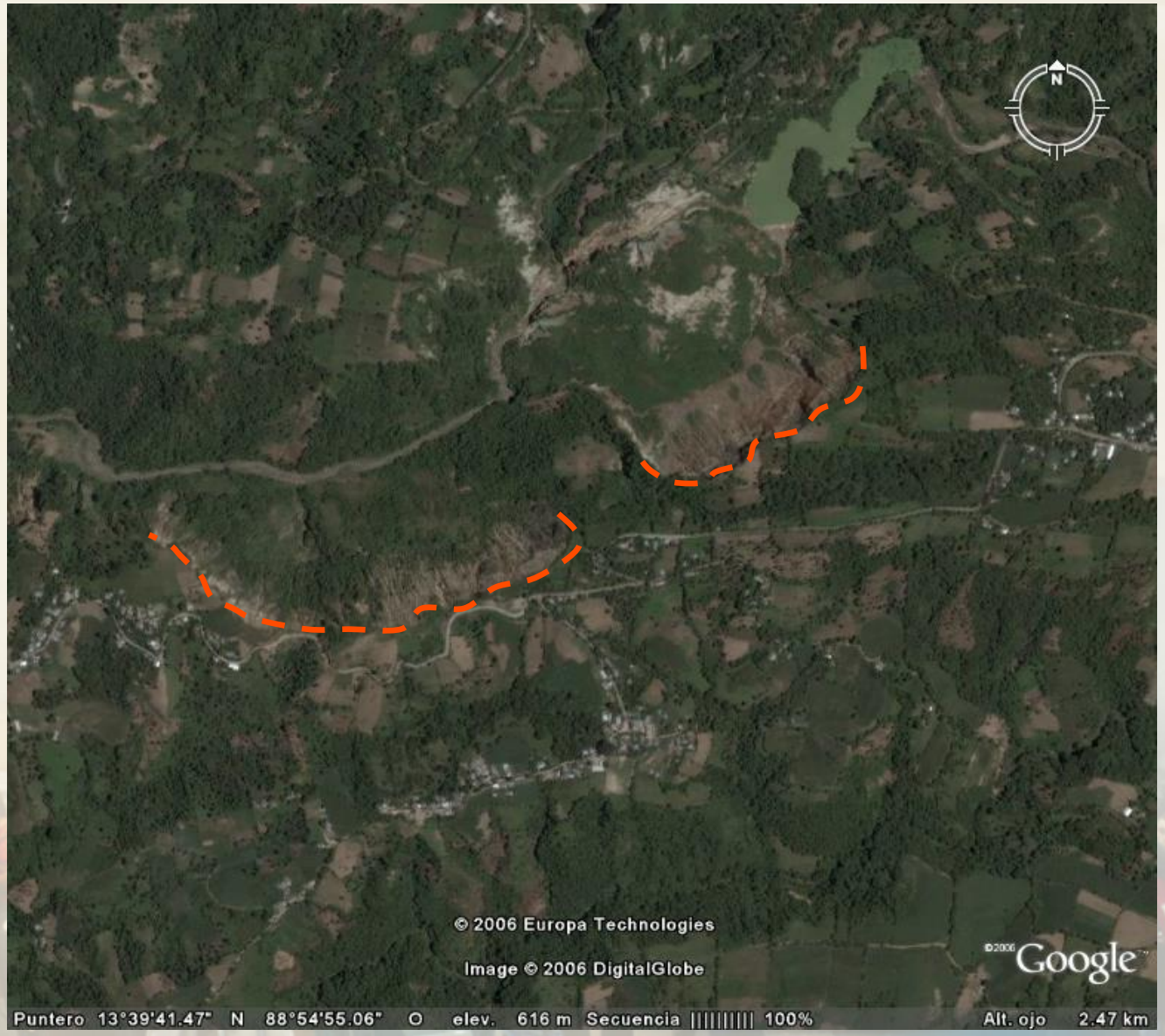
Interferogramma ENVISAT calcolato a partire da una coppia di immagini 1 Febbraio 2009 – 12 Aprile 2009. Le frange definiscono il campo di spostamento (quasi verticale) indotto dal terremoto. Il Massimo abbassamento è di circa 25 cm tra L'Aquila e Fossa (ogni frangia corrisponde a circa 2.5 cm).
I quadratini verdi indicano il mainshock (identificato anche dal meccanismo focale fornito da INGV-BO) e gli aftershocks con Mw > 5; la linea gialla indica le fratture superficiali osservate; i triangoli marcano la posizione dei caposaldi GPS utilizzati per il confronto con il SAR.
Il rettangolo nero mostra la proiezione in superficie del modello di faglia ottenuto a partire dai dati SAR.

ESTUDIO DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE TECNICAS DE TELEDETECCIÓN



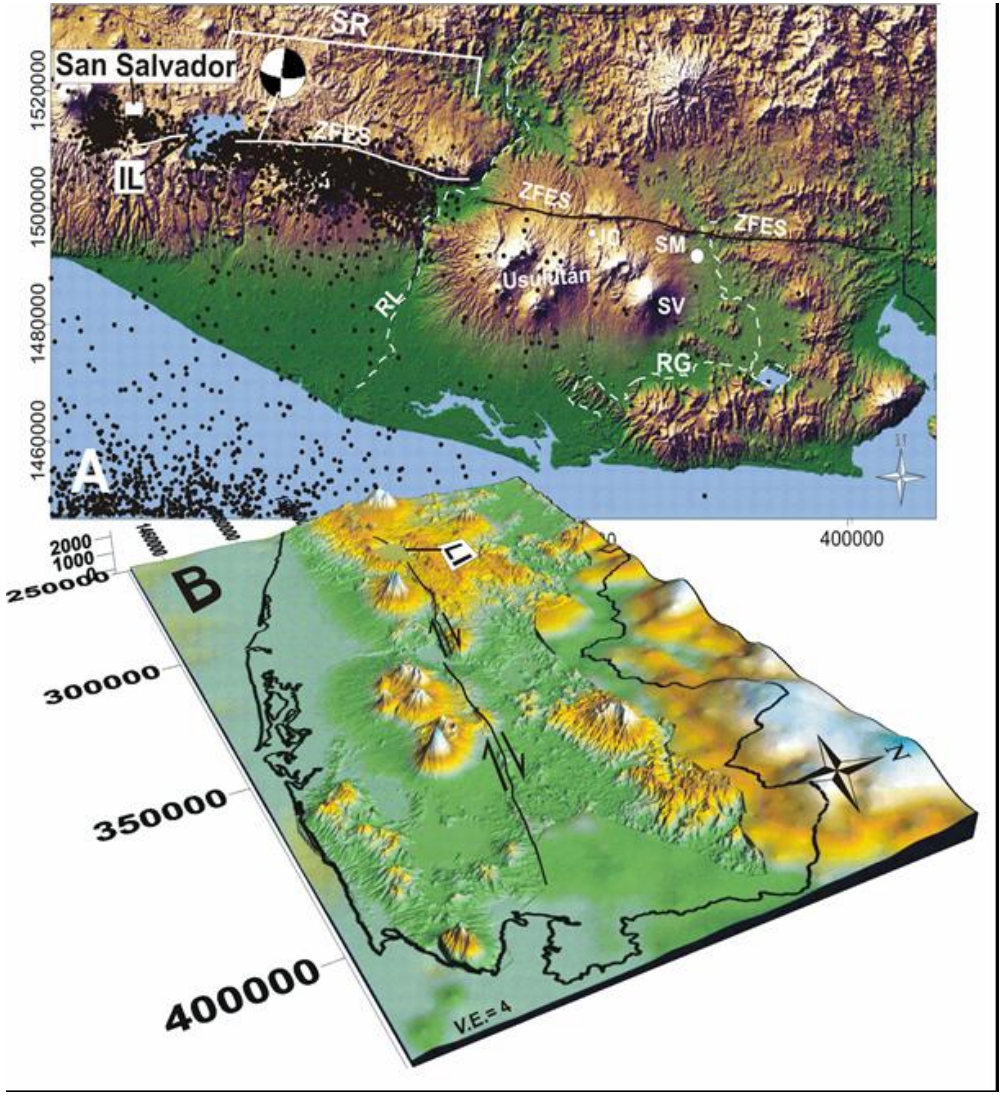


CUANTIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE DESLIAMIENTOS



APLICACIONES DE TELEDETECCIÓN

IDENTIFICACION DE UNA GRAN FALLA EN EL SALVADOR (EZFS)

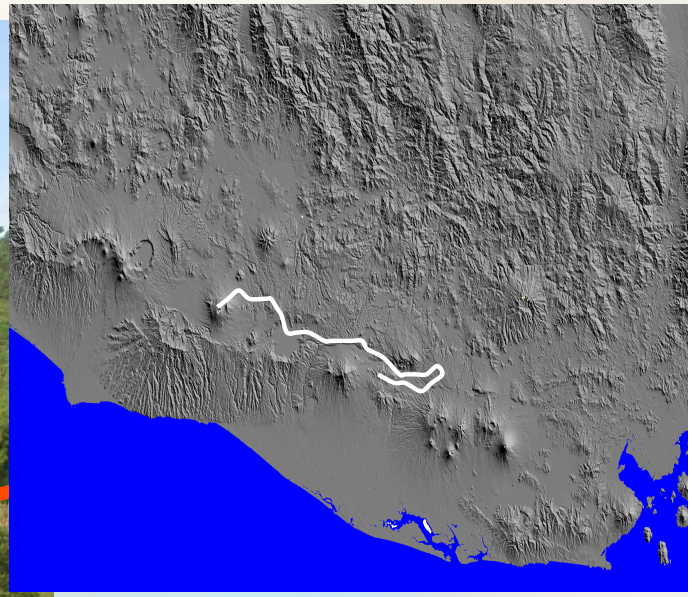


Interpretación tectónica global e Identificación de la Zona de Falla de El Salvador (EZFS)

Los datos apuntan a la existencia de una gran zona de falla en El Salvador ZFES, que ha sido la fuente de varios terremotos destructores de cadena volcánica.

El segmento SR rompió con el sismo del 13 de febrero y sus réplicas

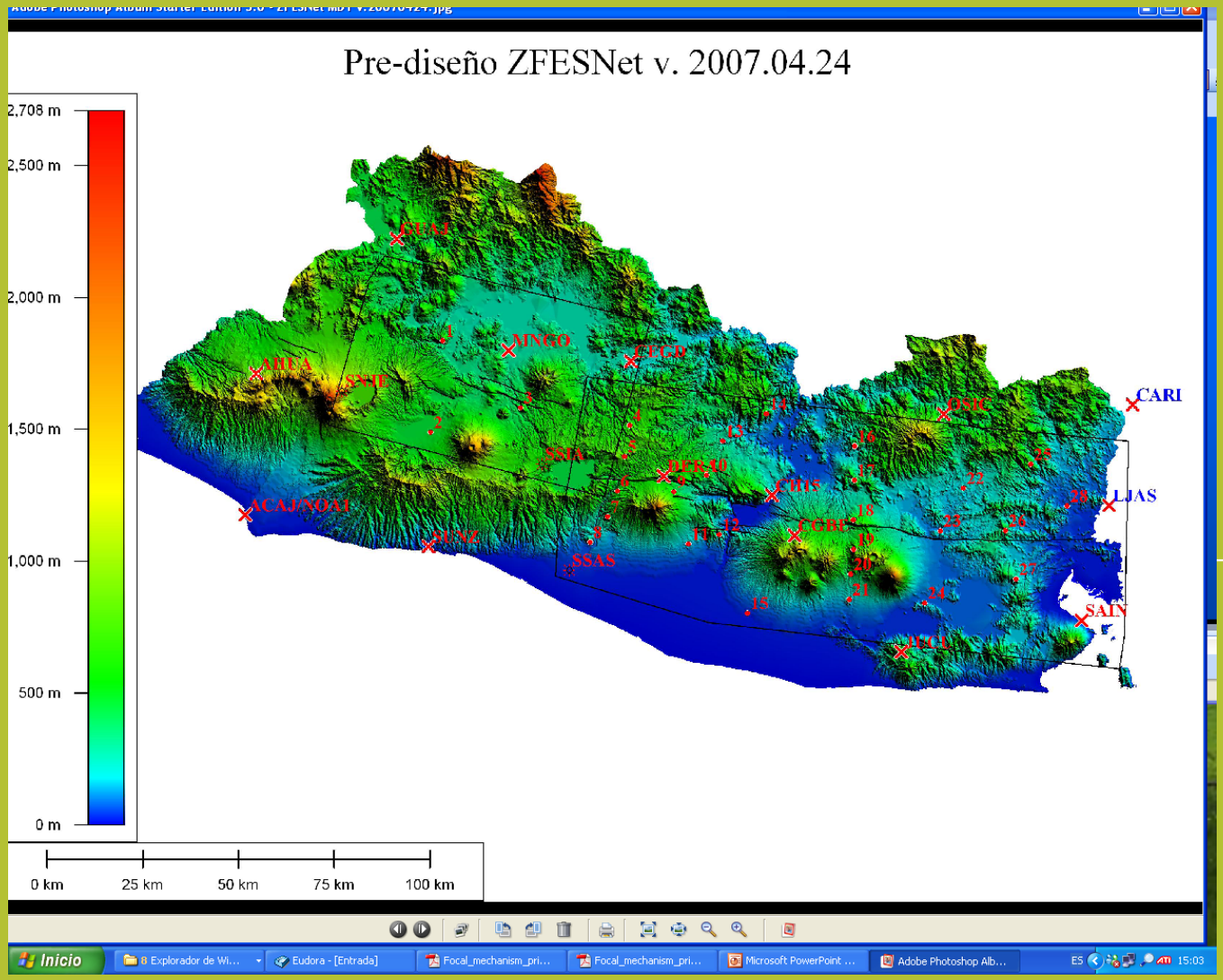
Reconocimiento en campo de la traza de la falla EZFS



Building Level Damage Assessment
'Before'
'After'
'Before'
'After'
'Before'
'After'
'Before'
'After'
ImageCat, Inc.

5. APLICACIONES GPS

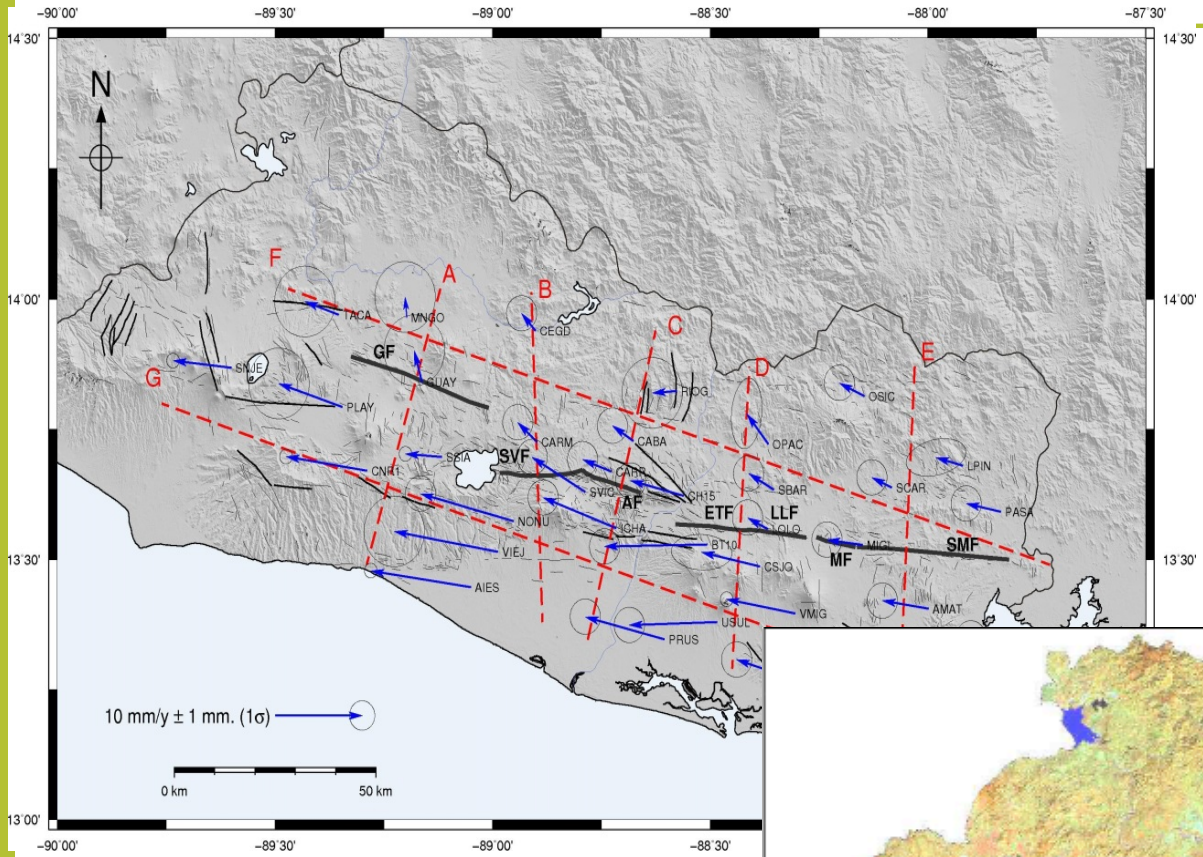
5 APLICACIONES GPS



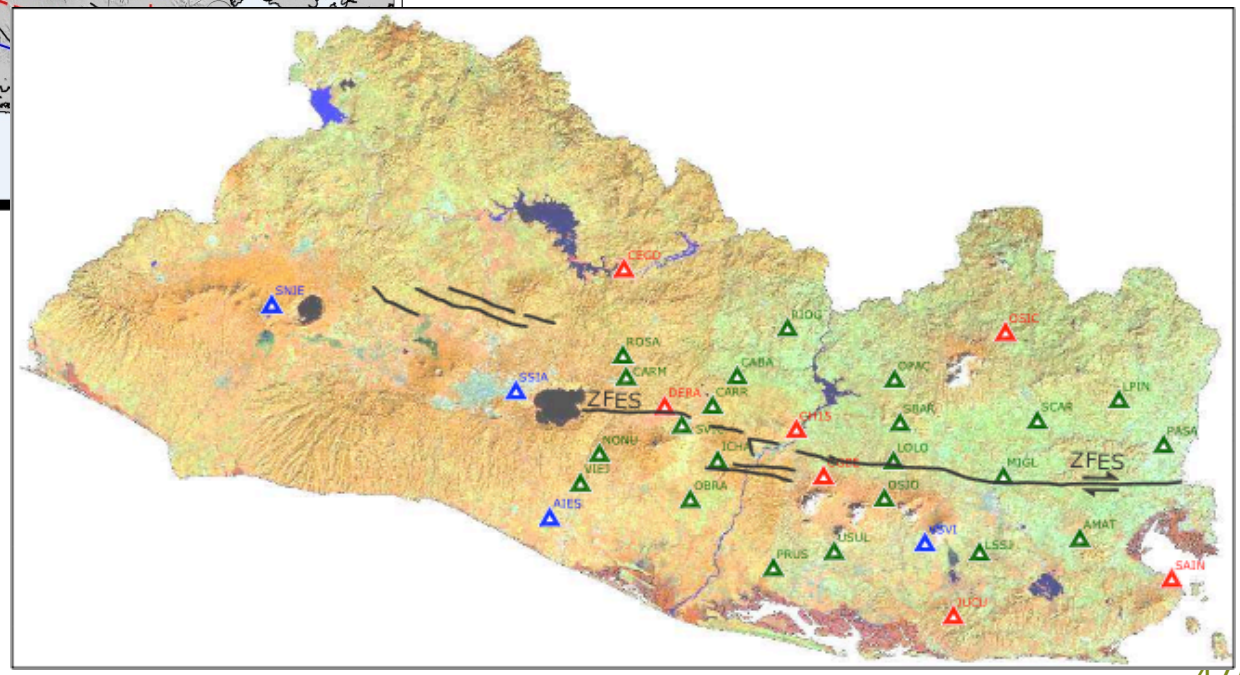
Red de observación para ZFESNET. determinar la tasa de deslizamiento en la Zona de Falla de El Salvador (EZFS)

Tesis doctoral de Sandra Staller

5 APLICACIONES GPS



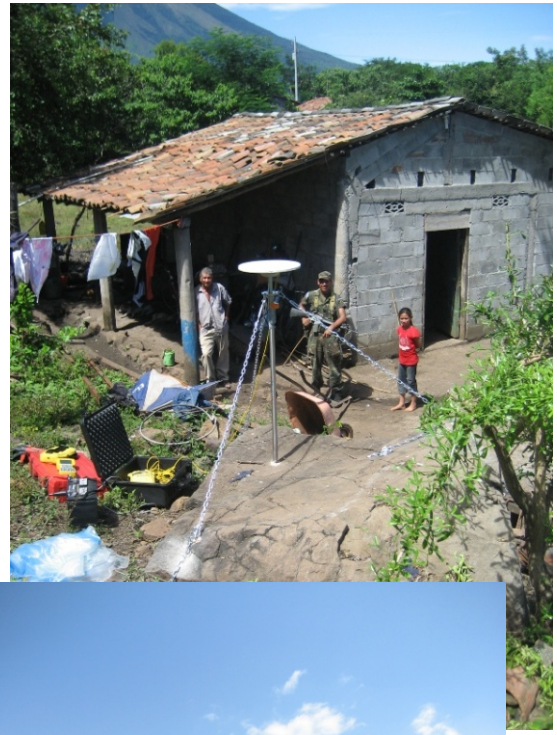
Red de observación ZFESNET.
para determinar la tasa de deslizamiento en la Zona de Falla de El Salvador (EZFS)



Mapa de estaciones GPS

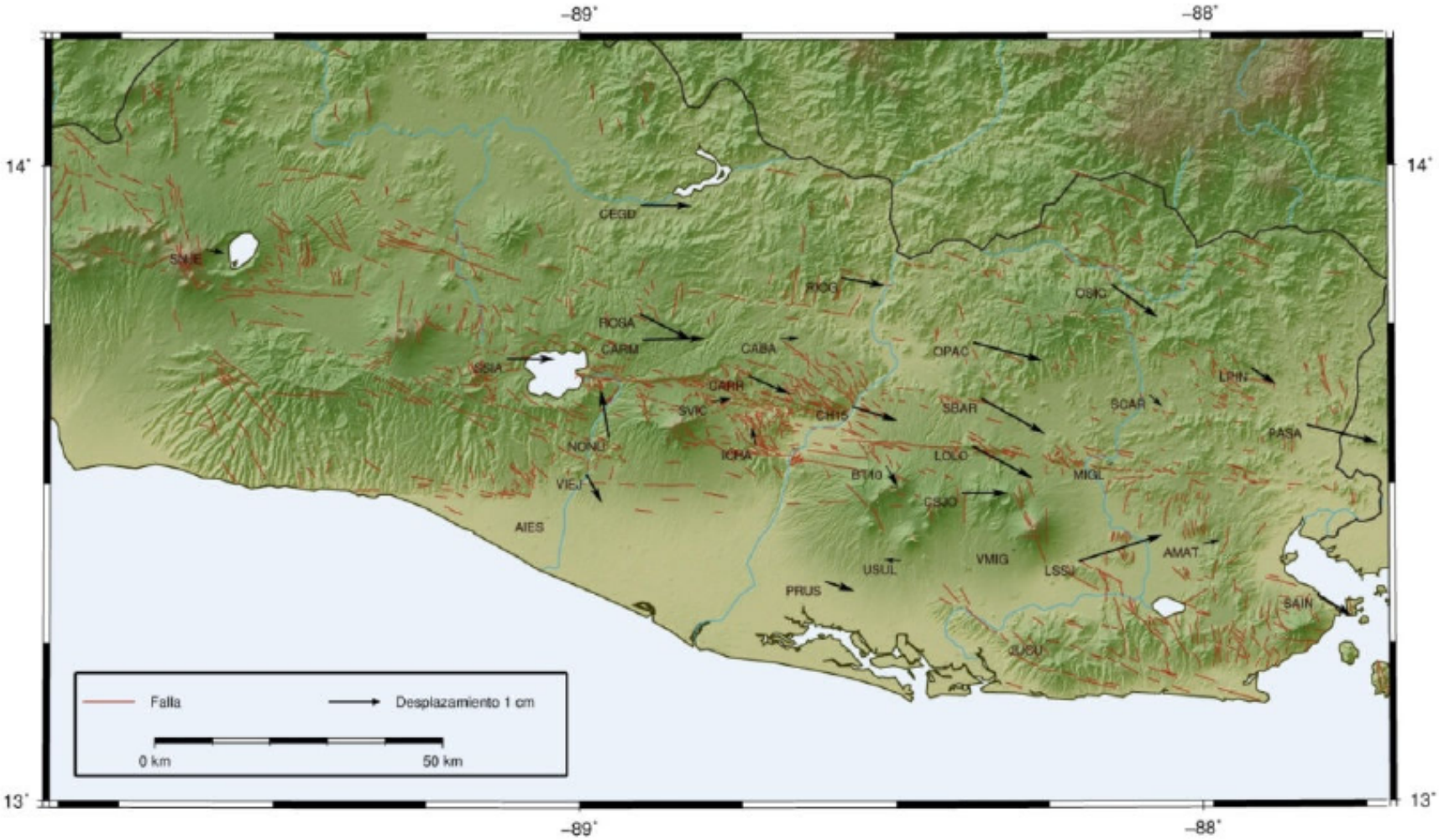
Campaña de observación GPS ZFESNET .

Campaña observación 2008.

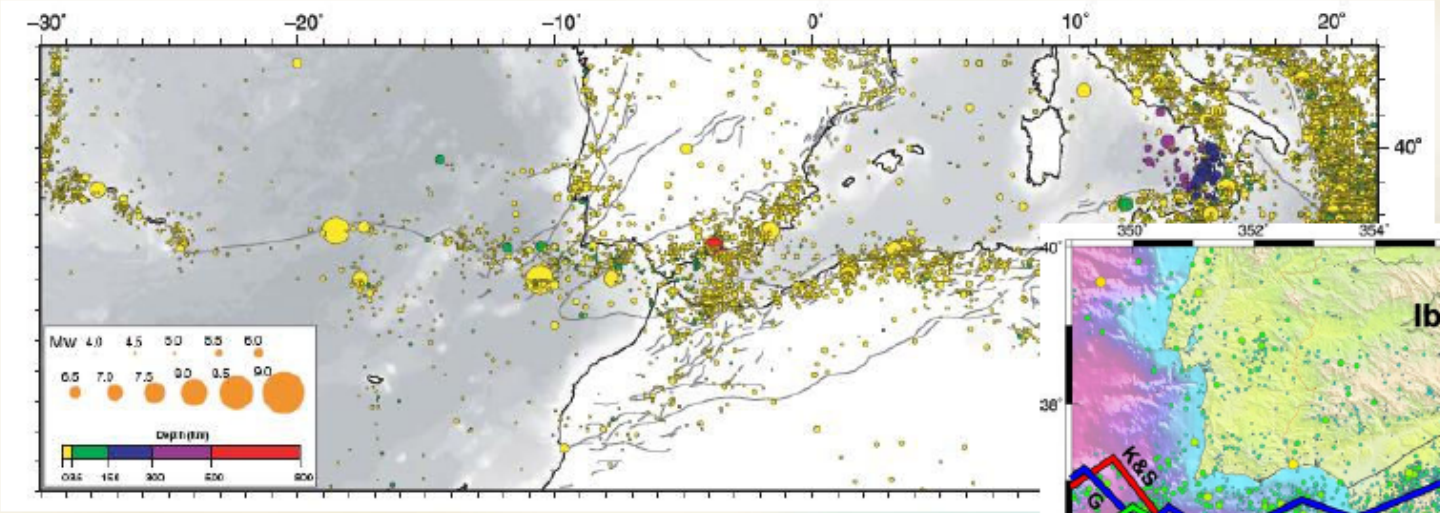


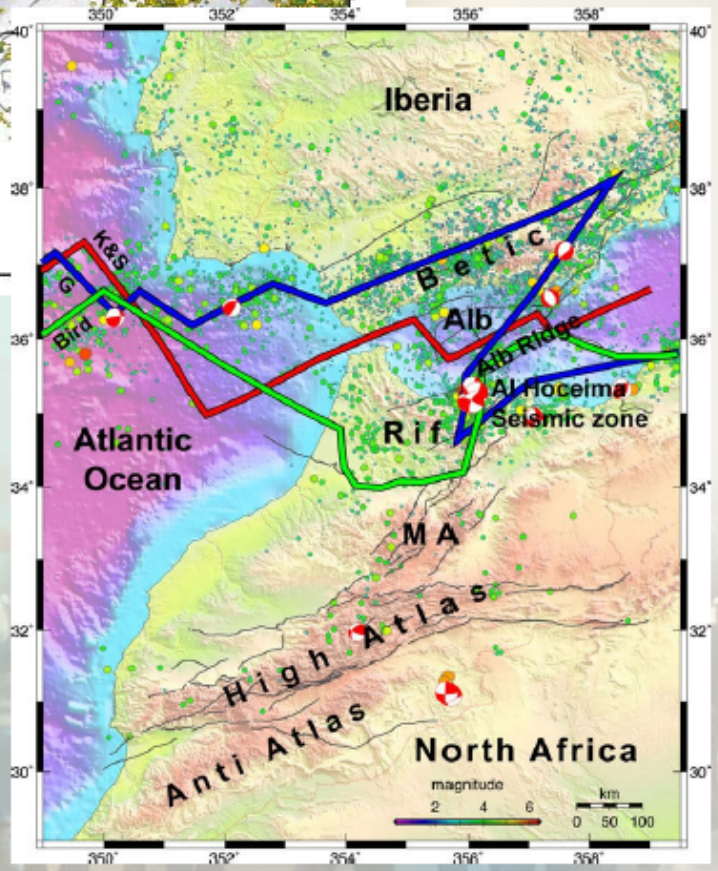
Campo de velocidades o tasas de deformación a lo largo de la falla EZFS

Resultado de varias campañas anuales de observación



Aplicación del GNSS en la determinación de la deformación de la corteza en bordes de placa

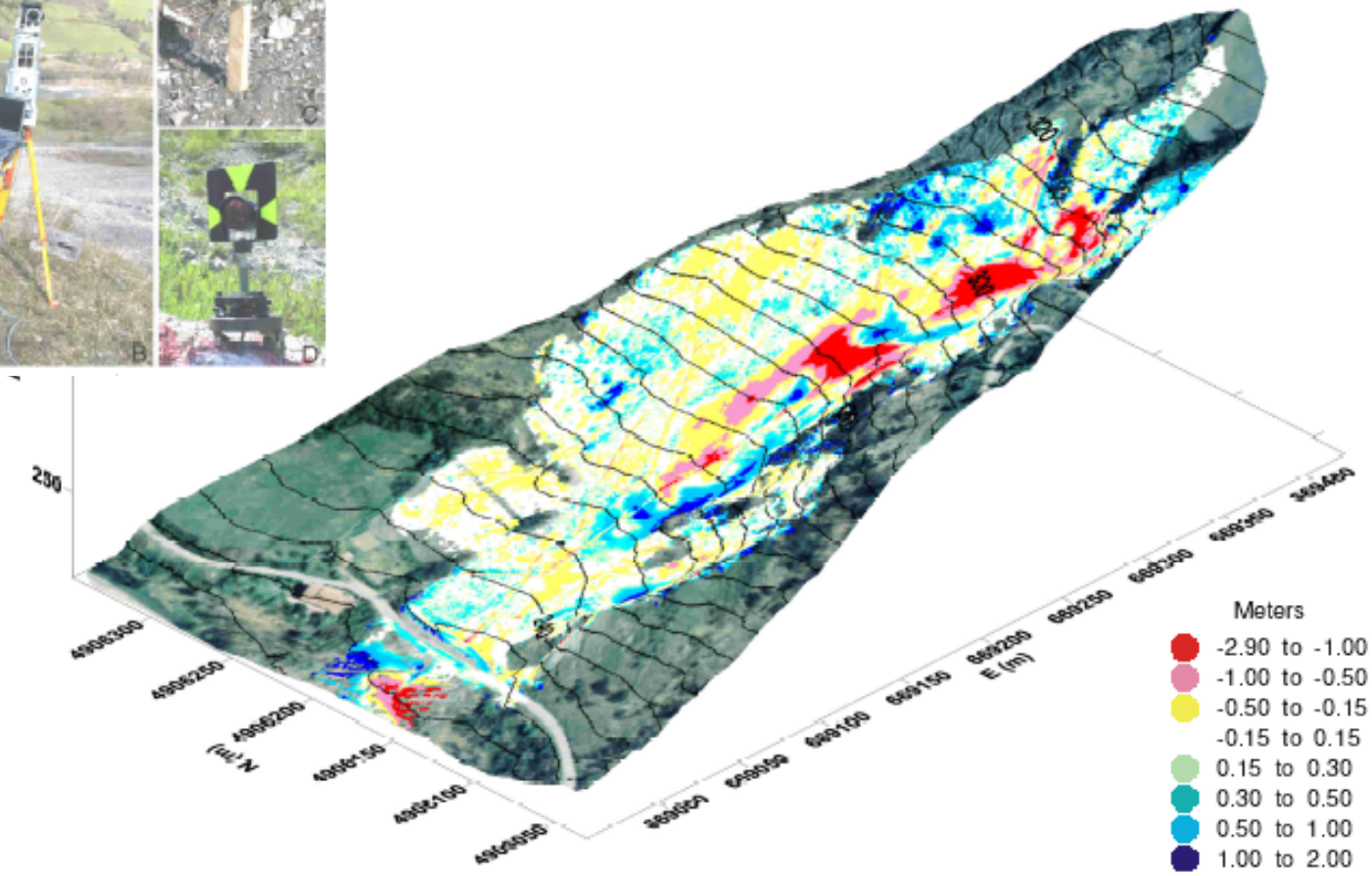


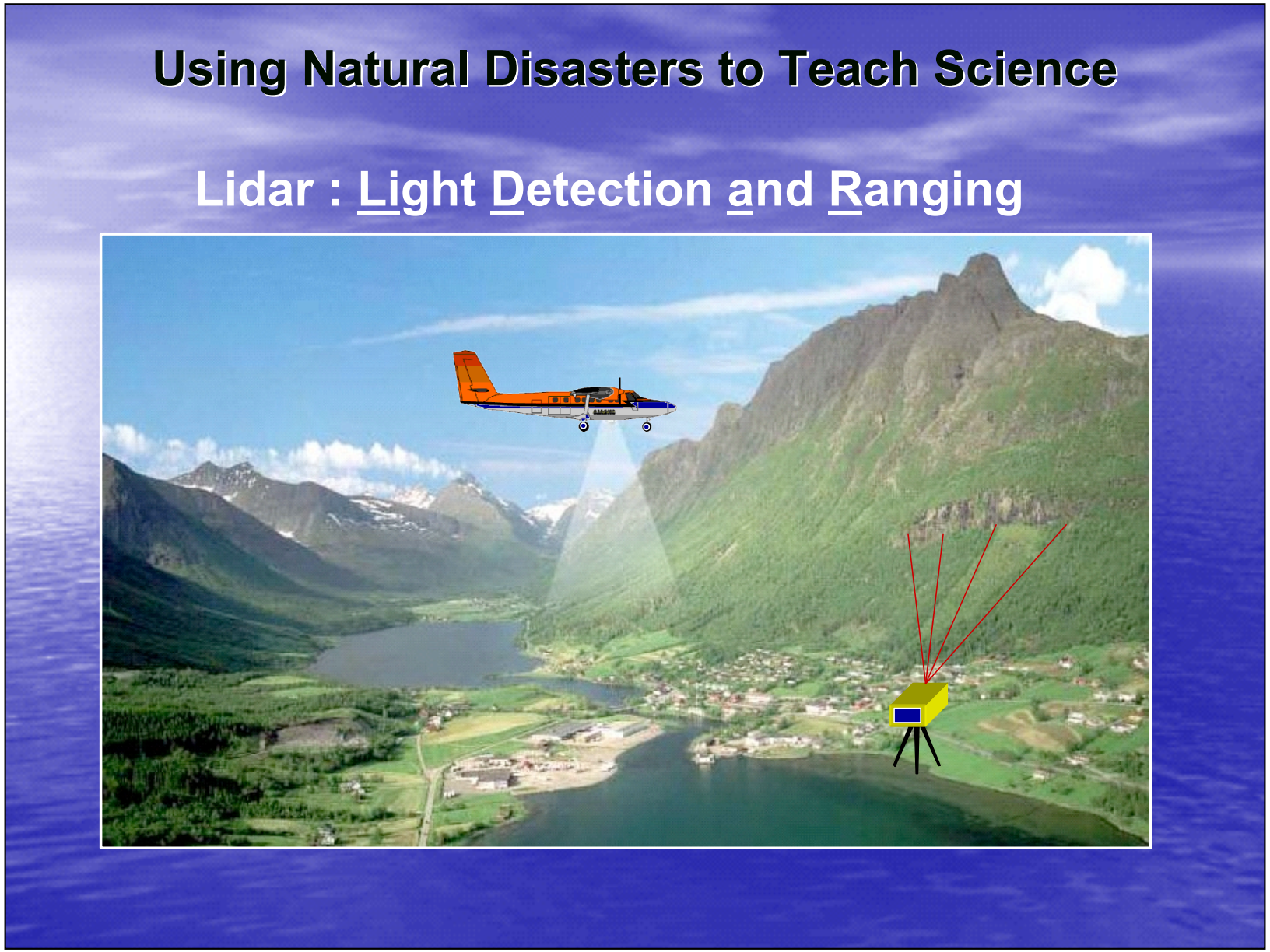


Modelo de deformación de la corteza en la zona sur de la Península Ibérica-Norte de Marruecos

6. OTRAS APLICACIONES

Laser Scanning Terrestre para la Detección de Movimientos de Laderas




Using Natural Disasters to Teach Science
Lidar : Light Detection and Ranging

ALSM, InSAR and TM imaging and mapping before & after

Pre- and post-disaster images can be differenced to measure damage and track recovery

Laser scan of land surfaces and urban infrastructure – buildings & lifelines
- *damage assessment*

LANDSAT 7 on SRTM showing earthquake damage - Bhuj, India

USGS

12 NAS - Irvine

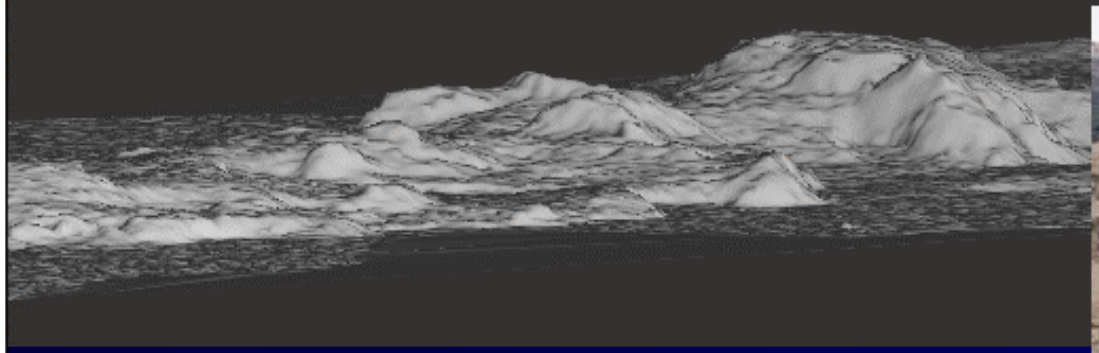
11% 12 de 30 253,3 x 189,8 mm

6 OTRAS APLICACIONES

Airborne laser swath mapping (ALSM)

- precise topographic mapping of surface ruptures and active fault scarps

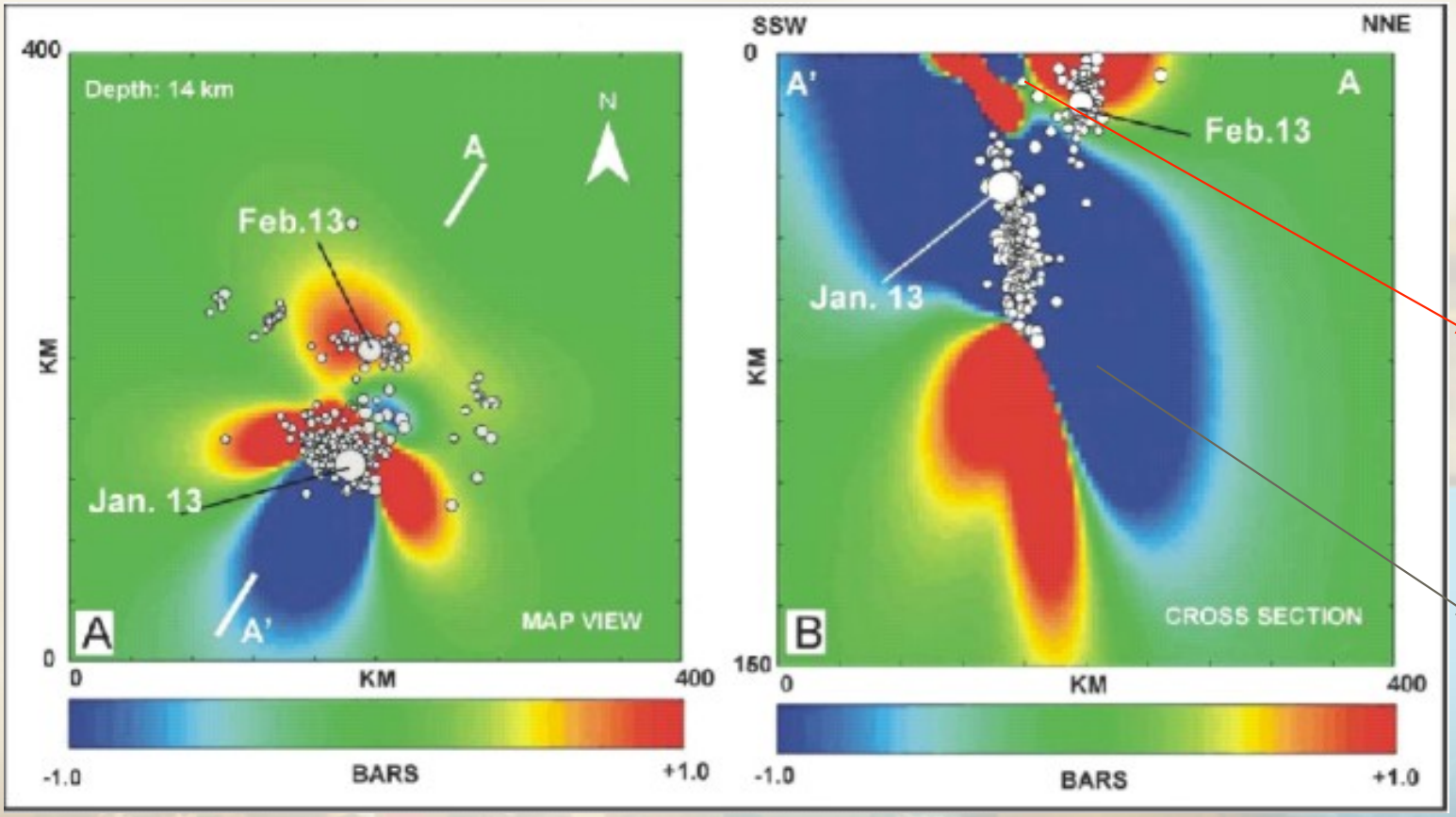
Airborne platform navigation must be highly precise and requires high-rate GPS data



- representation of actual fault ruptures recorded and preserved in unprecedented detail

USGS

Transferencias de Esfuerzos de Coulomb tras el terremoto del 13 de enero de 2001 en El Salvador



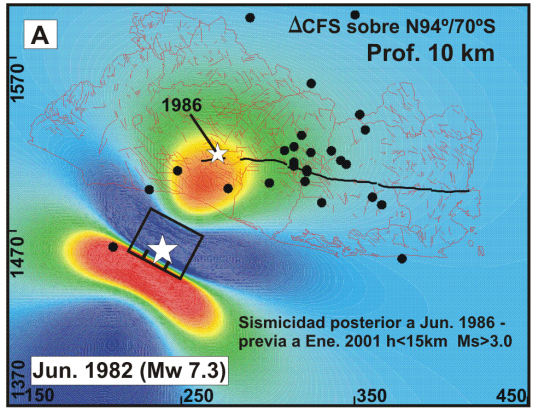
Aumento de esfuerzos

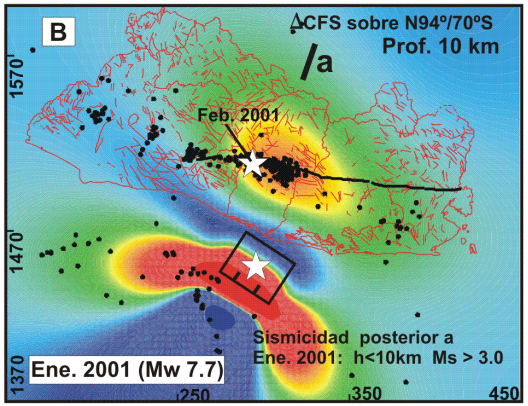
Disminución de esfuerzos

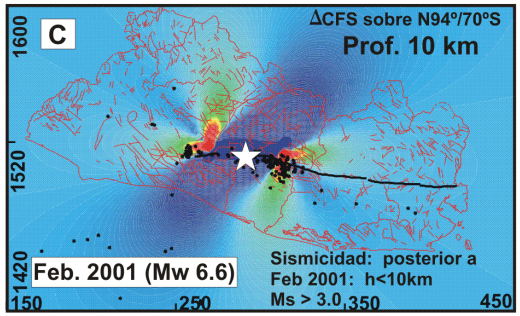
Transferencia de esfuerzos producida por el terremoto del 13 de Enero Se muestran también los hipocentros de los terremotos ocurridos 48 horas después de los dos sismos principales. La localización del sismo del 13 de Febrero se encuentra en una zona donde el esfuerzo ha crecido, tras el sismo principal del mes anterior

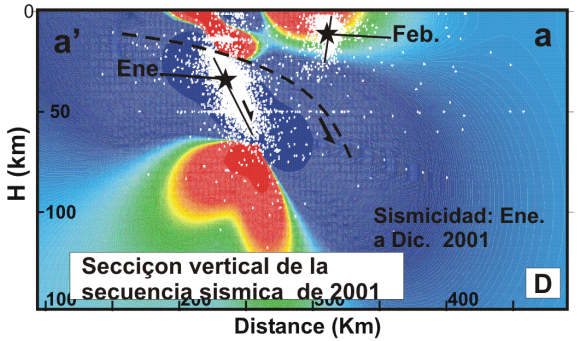
Identificación de zona más favorable a la ocurrencia de un sismo futuro

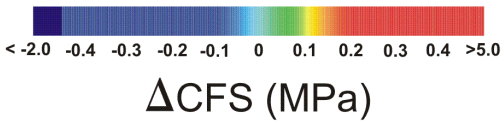
Modelo Tectónico Global

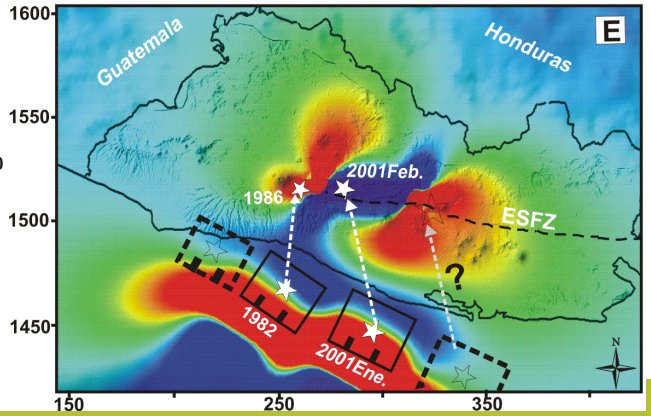












A) Modelo en planta de la transferencia de esfuerzos de Coulomb (CFS) inducido por el terremoto de 1982 sobre la ZFES. Se incluye la localización del sismo local de 1986 y los eventos posteriores con M> 3.

B) Modelo conjunto en planta de la transferencia de CFS inducida por los eventos de 1982, y Enero de 2001 sobre la ZFES para una profundidad de 10 km. Un sector importante de ZFES ha quedado cargado de esfuerzo de Coulomb. En él se produjo el sismo del 13 de Febrero, cuya localización se indica, junto con la de otros eventos con M>3.

C) Modelo de CFS generado únicamente por el sismo del 13 de Febrero, con representación de otros eventos locales ocurridos posteriormente. Se aprecia la localización de éstos fundamentalmente en zonas cargadas positivamente.

D) Modelo conjunto de CFS generado por los eventos de 2001 en el corte aa' de la figura 3.20B.

E) Modelo conjunto del CFS generado por los eventos principales de 1982, 1986 y 2001. Los rectángulos continuos representan superficies de ruptura. Los rectángulos discontinuos representan rupturas hipotéticas de zonas que han quedado cargadas.

Definición de niveles de prioridad en planes de emergencia:

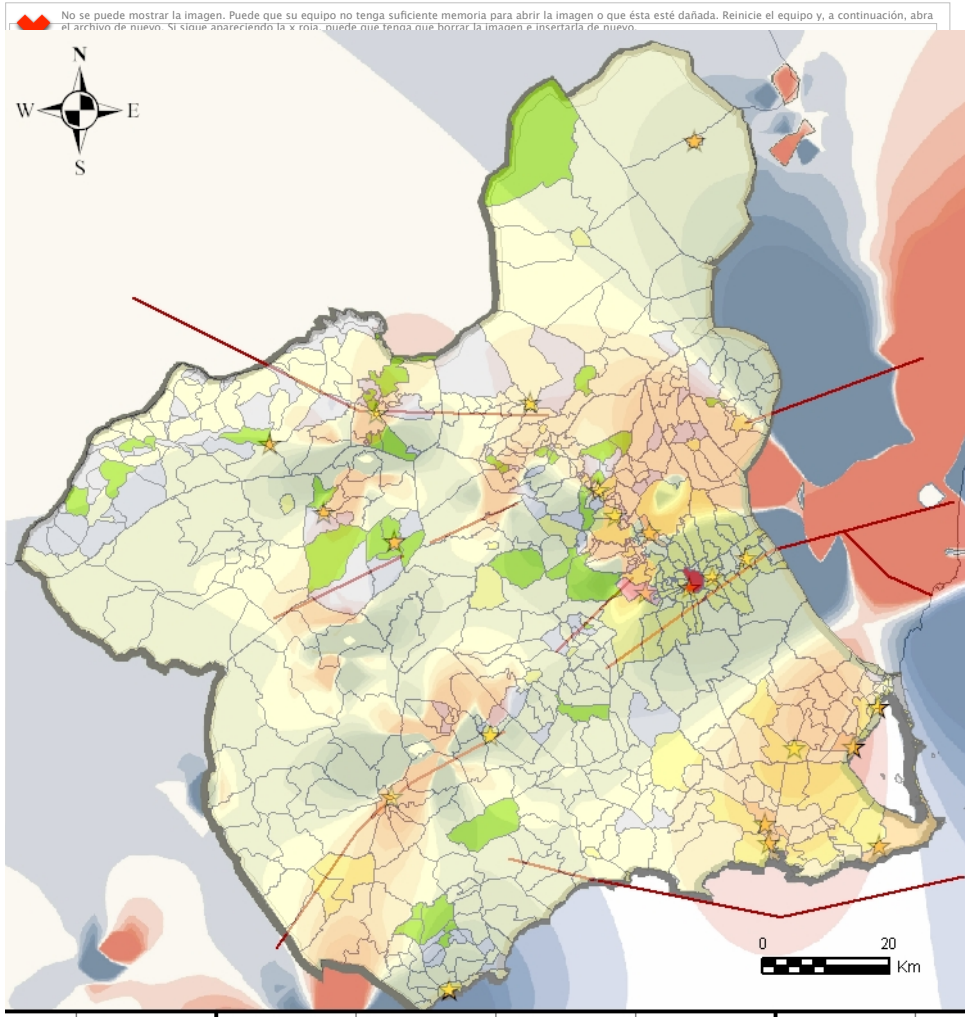
TRANSFERENCIA DE ESFUERZOS DE COULOMB en MURCIA
Proyecto RISMUR. Criterio definido en 2005 para identificar zonas prioritarias hacia las que canalizar estudios de detalle

Prioridad 1
- fallas cercanas
- zonas cargadas

Prioridad 2:
- No fallas cercanas
- zonas cargadas

Prioridad 3:
- fallas cercanas
- zonas descargadas

Prioridad 4:
- No fallas cercanas
- zonas descargadas



ZONAS DE ACTUACIÓN

Con PRIORIDAD 1

CONCLUSIÓN FINAL PROYECTO RISMUR EN 2005

ENTIDAD	MUNICIPIO	FALLAS PRINCIPALES PRÓXIMAS			Prioridad (1 es máximo)
		Falla	Segmento	Distancia mín (km)	
LORCA	Lorca	Alhama de Murcia	Lorca-Totana Pto.Lumbreras-Lorca	0 2	**1**
CALASPARRA	Calasparra	Socovos-Calasparra	Línea eléctrica Central	0 3	**1**
ALCANTARILLA	Alcantarilla	Alhama de Murcia Carrascoy	Alhama-Alcantarilla Sª de Carrascoy	3 6	**1**
CIEZA	Cieza	Socovos-Calasparra	Línea eléctrica	2	**1**
MOLINA DE SEGURA	Molina de Segura	Crevillente Carrascoy	Bullas-Sª Ricote Sª de Carrascoy	8 13	**1**
CEHEGIN	Cehegín	Crevillente	Campo Coy-Bullas	12	**1**

6 años mas tarde ocurrió el terremoto de Lorca de 2011, el mas destructiuvo de España en el último siglo !

7 Conclusiones

1) Los SIG son herramientas imprescindibles en estudios de peligrosidad y riesgo sísmico. Permiten:

Almacenamiento de datos de distinta procedencia
Operaciones de algebra de capas
Representación de mapas

2) Las técnicas de teledetección permiten:
reconocmiento de fallas con ruptura en superficie
Análisis de tipologías constructivas y asignación de la vulnerabilidad
Reconocimieno rápido de daños tras un terremoto
INSAR: Desplazamientos cosismicos

3) Los datos GPS permiten:
Conocer el campo de velocidades y tasas de deslizamiento a lo largo de falla
Deslizamiento cosismico

4) Los modelos de esfuerzos de Coulomb determinan las zonas mas favorables a nuevos eventos

5) Creciente auge de tecnicas LIDAR, camaras portátiles (mochila o coches) para reconocmiento de la vulnerabilidad y daños tras el terremoto

Reflexión Final

El terremoto es un fenómeno natural

El desastre no es natural…

GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN!