



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTOR: David Villacorta Cantí

DIRECTOR: Michele Crosetto

SUPERVISOR: Carlos López Martínez

DATA: 21 de juliol de 2009

Títol: Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit

Autor: David Villacorta Cantí

Director: Michele Crosetto

Supervisor: Carlos López Matínez

Data: 21 de juliol de 2009

Resum

En les últimes dècades s'han desenvolupat tècniques i sistemes per la mesura de les deformacions del terreny mitjançant l'ús de radars. Aquests radars es poden pujar en un avió o instal·lar en un satèl·lit per cobrir una major superfície. Apareixen, així, els sistemes radar d'obertura sintètica que combinats amb la tècnica interferomètrica permeten mesurar les deformacions del terreny en un determinat espai de temps.

En el present projecte, realitzat a l' Institut de Geomàtica i amb la col·laboració de la Unitat de Teledetecció Activa, es fa un estudi comparatiu entre dos maneres de mesurar les deformacions del terreny d'una zona, mitjançant aparells de mesura terrestre ubicats en la mateixa zona i mitjançant una tècnica interferomètrica, la tècnica PSI.

El projecte s'inicia explicant conceptes bàsics com el funcionament d'un radar, el sistema radar d'obertura sintètica i una definició del terme interferometria, per passar després a la tècnica InSAR, i les seves millores, les tècniques DInSAR i PSI. Posteriorment, es descriu el procés interferomètric. Per finalitzar, amb un estudi pràctic de l'efecte que té en el terreny el pas d'una tuneladora en una zona de Barcelona, on es compara, per una banda els resultats obtinguts amb aparells terrestres de mesura de les deformacions del terreny, i per l'altra banda, els resultats obtinguts mitjançant interferogrames generats a partir d'imatges captades des de satèl·lit de la zona d'estudi.

Title: Elaboration and analysis of radar images from satellite

Author: David Villacorta Cantí

Director: Michele Crosetto

Supervisor: Carlos López Matínez

Date: July, 21st 2009

Overview

In recent decades, new techniques and systems to measure terrain deformation through the use of radars have been developed. These can be set in aeroplanes or installed in satellites to cover a greater surface. Synthetic aperture radar systems that when combined with interferometric techniques allowing to control terrain distortions in a given timeline.

This current project, prepared at the Institut de Geomàtica with the cooperation of the Unitat de Teledetecció Activa makes a comparative study between two ways of measuring a surface's terrain distortions through devices for terrestrial measurements located in the area, and through an interferometric technique, namely the PSI technique.

The project begins commenting on basic concepts such as the operation of a radar, the synthetic aperture radar system, then defines the term interferometry and eventually deals on InSAR technique and its improved DInSAR and PSI techniques. It goes on to describe the interferometric process. At the end, a practical analysis of the effect that a tunnel machine has on the terrain in an area of Barcelona, where it compares on the one hand the result obtained with terrestrial devices of measurement for terrain distortions and on the other, the results obtained with interferograms generated from images captured from satellite of the area object of study.

ÍNDIX

INTRODUCCIÓ	1
CAPÍTOL 1. FONAMENTS D'INTERFEROMETRIA.....	2
1.1. Conceptes bàsics	2
1.1.1. Radar.....	2
1.1.2. Sistema SAR	3
1.1.3. Interferometria	6
1.2. Interferometria SAR (InSAR)	6
1.3. Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)	10
1.3.1. Models digitals del terreny.....	10
1.3.2. Tècnica DInSAR	11
1.4. Interferometria diferencial SAR avançada	12
1.4.1. Tècnica PSI	12
CAPÍTOL 2. PROCÉS INTERFEROMÈTRIC	13
2.1. Descripció general	13
2.2. Procés interferomètric en l'estudi pràctic de subsidència	15
2.2.1. Adquisició d'imatges i generació de interferogrames.....	15
2.2.2. Estimació error topogràfic i velocitat lineal de deformació	16
2.2.3. Desenrotllament de la fase.....	20
CAPÍTOL 3. ESTUDI PRÀCTIC DE SUBSIDÈNCIA	22
3.1. Descripció general	22
3.2. Mesures terrestres (MT).....	23
3.3. Anàlisi interferomètric	24
3.3.1. Imatges i interferogrames.....	24
3.3.2. Mesures terrestres, punts referència i interferomètrics.....	25
3.3.3. Els resultats i la seva interpretació	28
3.4. Anàlisi dels residus dels interferogrames	41
3.4.1. Gamma envers desviació estàndard dels residus.....	41
3.4.2. Deformació del terreny envers dels residus	44
CONCLUSIONS.....	53
BIBLIOGRAFIA	55

ANNEX A: RELACIÓ IMATGES - INTERFEROGRAMES	59
ANNEX B: GRÀFICA PÍXELS	64
ANNEX C: PROGRAMA.....	65

INTRODUCCIÓ

L'objectiu principal d'aquest projecte es presentar un sistema i procés interferomètric i fer un anàlisi a nivell d'usuari dels resultats obtinguts d'aquest procés interferomètric en un estudi pràctic. Per això, s'ha dividit el present projecte en tres capítols.

El primer capítol comença explicant conceptes bàsics com el funcionament d'un radar, el sistema SAR (radar d'obertura sintètica) i una definició de la interferometria. Després s'explica la tècnica InSAR, on s'ajunten els sistema SAR amb la tècnica interferomètrica. Posteriorment, es passa a la tècnica DInSAR (InSAR diferencial) on s'usa un model digital del terreny per tal d'ajustar millor els resultats de les mesures. Finalment, es parla de PSI com una tècnica millorada del DInSAR per a mesurar les deformacions del terreny.

El segon capítol explica el procés interferomètric, que normalment rep el nom de cadena interferomètrica. Es dona una visió general de tot el procés interferomètric. De tot aquest procés complex, ens centrarem només en quatre punts, els més interessants per l'estudi comparatiu que es tractarà en el següent capítol.

El tercer capítol fa un estudi comparatiu del anàlisi de les deformacions patides a la superfície en una determinada ubicació de la ciutat de Barcelona. Es tenen els resultats efectuats amb aparells de mesura terrestre de la subsidència del sòl d'una determinada zona de la ciutat de Barcelona en un període determinat de temps. Aquestes mesures es van efectuar durant el pas d'una tuneladora per la zona en qüestió, i les seves subseqüents obres, amb l'objectiu de controlar les subsidències en el sòl. Per tant, l'estudi comparatiu consisteix en aplicar el procés interferomètric a aquesta la zona de Barcelona basant-se en imatges captades per satèl·lit en el mateix període de temps. Aquest procés interferomètric es torna a realitzar però, aplicant-li una petita variació en el model de càlcul per veure si així es poden afinar millor els resultats. Finalment, es comparen els resultats obtinguts en cada procés amb els resultats obtinguts en les mesures fetes amb els aparells terrestres. S'ha de tenir en compte que els aparells terrestres tenen una precisió de l'ordre del mil·límetre, ara bé, a nivell econòmic, són mesures molt costoses. Per tant, interessa saber si les mesures interferomètriques, molt més econòmiques, podrien donar els mateixos resultats, i quina precisió podrien oferir. Es a dir, la pregunta seria, podria ser pràctic controlar les subsidències que el sòl pot patir, durant certs moviments crítics del terreny, mitjançant l'anàlisi de les imatges captades des d'un satèl·lit?

El procés interferomètric no és un procés senzill però, un segon objectiu que es persegueix en aquest projecte és que un lector neòfit en la matèria pugui seguir les explicacions. S'espera que l'estudi que es presenta en el tercer capítol, que tracta un tema que desperta certa curiositat, ajudi en aquest segon objectiu.

CAPÍTOL 1. FONAMENTS D'INTERFEROMETRIA

Aquest primer capítol ens introdueix en el món de la interferometria. Per anar avançant d'una manera comprensible, s'ha dividit en quatre apartats.

En un primer apartat es fa una breu descripció del funcionament del radar. Després s'explica el sistema SAR i el que ens permet obtenir. Finalment, s'introdueix el concepte de interferometria.

En un segon i tercer apartat, s'expliquen les tècniques InSAR i DInSAR respectivament. Bàsicament, la segona és una continuació de la primera amb l'afegit de que s'ha d'usar un DEM. Aquests dos apartats s'ha realitzat basant-nos en un document que va publicar l'Agència Espacial Europea i que està dividit en tres parts: A, B i C. D'aquestes tres parts, ens hem basat en les dues primeres A i B (veure [1] i [2]).

Finalment, en un quart apartat s'explica un dels avenços en el camp de la interferometria, la tècnica PSI. Bàsicament parlem del mateix funcionament que la tècnica DInSAR però, s'incorporen el concepte de punt permanent.

1.1. Conceptes bàsics

Els conceptes bàsics es dividiran en:

1. Radar
2. Sistema SAR
3. Interferometria

1.1.1. Radar

El radar, terme derivat de l'acrònim anglès **Radio Detection And Ranging**, que traduït al català seria *detecció i mesura de distàncies per ràdio*, és un sistema que utilitza ones electromagnètiques per mesurar distàncies, altituds, direccions i velocitats d'objectes estàtics o mòbils com aeronaus, vaixells, vehicles motoritzats, formacions meteorològiques i el propi terreny.

Una manera de mesurar la distància entre el radar i un objecte és transmetre un petit pols electromagnètic i mesurar el temps que tarda l'eco en anar i en retornar.

$$r = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t \quad (1.1)$$

On els paràmetres són:

$r \rightarrow \text{distància}$

$c \rightarrow \text{velocitat llum} \Rightarrow 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$t \rightarrow \text{temps}$

Com mesurem el doble recorregut, aquest temps s'ha de dividir entre dos per saber la distància que hi ha entre el radar i l'objecte.

Els radars poden ser:

- Actius: Quan emeten un senyal i reben la reflexió. Aquests poden funcionar amb dos tipus de sistema:
 - RAR: Radar d'obertura real
 - SAR: Radar d'obertura sintètica
- Passius: Quan només reben.

En aquest projecte en centrarem en els radar actius del tipus de sistema SAR.

1.1.2. Sistema SAR

Radar d'obertura sintètica és la traducció per l'acrònim SAR de l'expressió anglesa **Synthetic Aperture Radar**. És un sistema radar actiu que mitjançant una antena ubicada en un avió o satèl·lit emet un senyal format per una ràfega de polsos de radiofreqüència. Amb aquests polsos electromagnètics s'il·lumina una àrea del terreny i es recull el ressò produït per la reflexió en el sòl, es a dir, en la superfície terrestre. Després d'un processat s'obté una imatge de reflexió de la superfície il·luminada. Els senyals processats pel sistema SAR poden generar imatges de alta resolució.

El senyal surt de l'antena fins arribar al sòl, on rebota i retorna a l'antena, que fa funció d'emissor i receptor. Tot aquest procés d'anada i de retorn del senyal demanda d'un cert temps i és precisament aquest el que ens ajuda a mesurar la distància (1.1) a la que es troba la superfície del sòl. Al comparar les fases de totes les senyals en un mateix punt, podem mesurar les deformacions que ha hagut en un punt del sòl.

L'antena és relativament petita però, com és va emmagatzemant l'amplitud i la fase de cada senyal que rebota a mesura que es va desplaçant l'aeronau o satèl·lit, és possible combinar els resultats de les diverses senyals de tal manera que es pot obtenir un resultat com si es tractés d'una antena més gran, com si l'antena s'obris. Per això es parla de radar d'obertura sintètica.

Aquesta capacitat d'emmagatzemar l'amplitud i la fase de la senyal, obre un ampli ventall de possibilitats i aplicacions que van des de la simple detecció d'un blanc,

al càlcul de velocitats d'elevació i variació del terreny amb una precisió de mil·límetres.

El sistema SAR treballa en el rang espectral de les microones, el que el fa poc sensible a les condicions atmosfèriques i fa possible la seva operativitat amb independència de fonts externes.

Com s'ha comentat el sistema SAR pot anar muntat en un avió (SAR transportat) o en un satèl·lit (SAR orbital). En aquest projecte ens centrarem en el SAR orbital, que agafa imatges des d'una distància molt més elevada que la d'un avió, una distància d'uns 850 km, el que permet cobrir regions més amples, això sí, amb el peatge de la resolució, es a dir, major superfície però a canvi d'una menor resolució. Concretament ens centrarem en la captura d'imatges dels satèl·lits ERS-1, ERS-2 i Envisat.

Així, en aquest projecte, el sistema SAR va ubicat en un dels satèl·lits citats. La antena del radar està dirigida cap a la superfície terrestre en el pla perpendicular a l'òrbita (a la pràctica, això no és del tot cert, ja que és necessari compensar la rotació de la Terra). La inclinació de l'antena respecte al nadir s'anomena angle **off-nadir** i en els actuals sistemes, en general, oscil·len entre 20° i 50° (21° en els satèl·lits ERS). Degut a la curvatura de la superfície terrestre, l'angle d'incidència de la radiació sobre un pla horitzontal del terreny és més gran que el angle **off-nadir** (típicament 23° pels ERS). Tanmateix, per a simplificar, es suposarà que la superfície terrestre és plana, i, per tant, que l'angle d'incidència és igual al **off-nadir angle**, com es mostra a la següent figura.

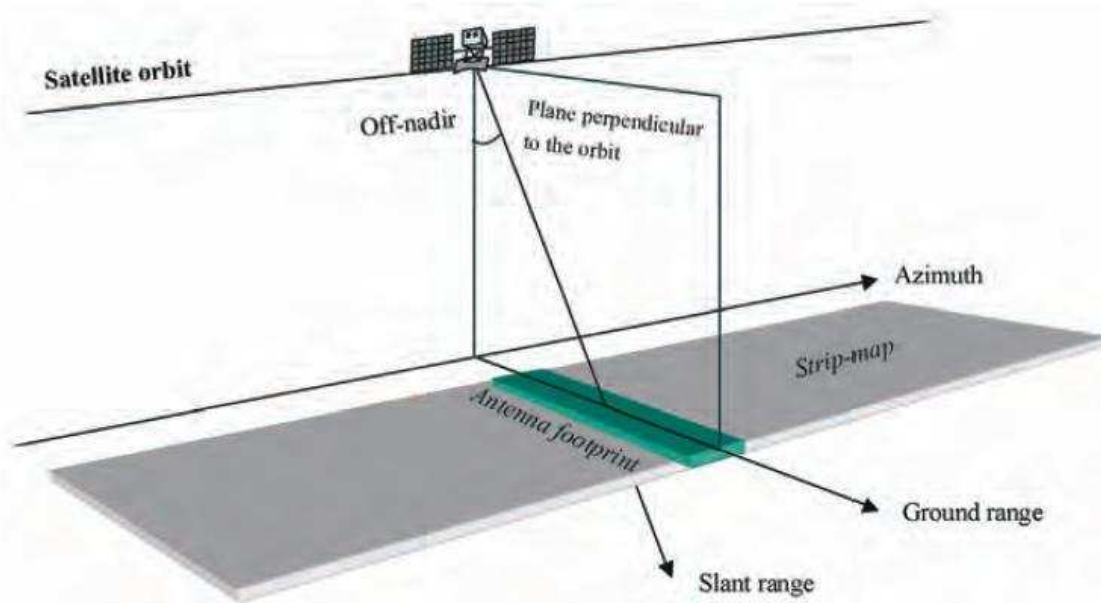


Fig. 1.1 Sistema SAR

En el sistema SAR muntat en els satèl·lits ERS-1, ERS-2 i Envisat la banda de microones on es treballa és de 5,3 GHz. A més a més, la zona il·luminada en el terra, *empremta de l'antena (antenna footprint)* és de uns 5 km en la direcció paral·lela al recorregut del radar o direcció **azimuth** i d'uns de 100 km en la direcció perpendicular al recorregut del radar o direcció **ground range**. L'*empremta de l'antena* traça una franja de 100 km d'ample en la superfície terrestre, amb la capacitat de cobrir franges d'uns 445 km de llarg cada minut (**strip map mode**).

La direcció **slant range** també s'anomena *línia de visió (Line Of Sight, LOS)*.

Un eco de radar implica una amplitud i una fase. Com ja s'ha explicat el ressò produït per la reflexió en el sòl de la zona il·luminada pels polsos electromagnètics del radar, i un cop aquest recó és processat, pot generar una imatge de reflexió de la superfície il·luminada, o imatge SAR.

Aquesta imatge SAR és digital i es pot veure com una matriu bidimensional formada per columnes i files de petits elements de la imatge o píxels. Cada píxel s'associa amb una petita àrea de la superfície terrestre. A aquesta àrea se l'anomena *cel·la de resolució*. Cada píxel dona un nombre complex que porta informació en l'amplitud i en la fase sobre el camp de microones que retorna després d'haver impactat sobre els diferents elements que troba en la superfície terrestre (llacs, roques, vegetació, edificis, etc) dins de la *cel·la de resolució* corresponent al projectat sobre el terreny. Les diferents files de la imatge estan associades amb les diferents ubicacions en **azimuth**, mentre que les diferents columnes indiquen les diferents ubicacions en **slant range**. La ubicació i la dimensió de la *cel·la de resolució* en les coordenades **azimuth** i **slant range** només depenen de les característiques del sistema SAR.

Així una imatge SAR està caracteritzada per l'amplitud i la fase, es a dir, aquestes mesures, ens donen informació sobre la mateixa.

- L'amplitud de la imatge SAR capta la reflexió, es a dir, la habilitat que té el terreny de retornar al radar l'energia que li ha arribat des d'aquest. Així, un llac tranquil apareix fosc en la imatge, ja que la superfície de l'aigua actua com un reflector perfecte, allunyant el senyal del satèl·lit. Per altre banda, estructures metàl·liques, finestres, taulades, terrats, ponts damunt de l'aigua apareixen brillants en la imatge, ja que retornen al satèl·lit bona part de l'energia que han rebut.
- La fase de la imatge SAR es dona informació sobre el retard de la senyal entre la seva transmissió i la seva recepció. De fet, la diferència de fase entre transmissió i recepció es equivalent al retràs temporal del senyal. Degut a la natura sinusoidal del senyal, amb un període de 2π , el canvi de la fase ϕ del senyal es dues vegades el recorregut r (anada i tornada) dividit entre la longitud d'ona λ .

$$\phi = 2\pi \cdot \frac{2r}{\lambda} \quad (1.2)$$

1.1.3. Interferometria

El terme interferometria deriva de la paraula interferència. El fenomen de la interferència es produeix quan es treballa amb ones, sigui quina sigui la seva naturalesa (ona acústica, ona lluminosa, ona electromagnètica, ona oceànica, ona sísmica produïda per terratrèmols). La interferència es produeix quan dues ones arriben al mateix lloc al mateix temps. Depenent de la mesura de cada una de les ones (amplitud) i dels seus angles d'atac (fase), aquestes quan es trobin, es sumaran o es restaran.

La interferometria es pot definir com la tècnica que usa el fenomen de la interferència de microones electromagnètiques d'un radar, amb l'objectiu de mesurar angles petits i lleugeres variacions en la distància de separació d'un objecte en respecte d'un altre.

En aquest projecte, el principi de la interferometria es basa en les diferències existents entre dues imatges radar, que reben el nom de **master** i **slave**. La diferència clau és la de la fase, que pot ser deguda, o a un canvi en la posició, (per exemple, quan dues antenes en un pla adquireixen imatges a la vegada), o a una variació temporal (per exemple, quan una antena que adquireix dues imatges en dos moments temporals diferents). La diferència de fase resultant genera un nou tipus d'imatge anomenada interferograma. És important però, que abans ambdues imatges, **master** i **slave**, hagin estat correctament corregistrades. Quan més bona és aquesta corregistració entre imatges més alt és el valor de la seva coherència. Aquest valor va de 0 a 1, on el valor 0 serà per coherència inexistent i el valor 1 serà per la coherència ideal.

1.2. Interferometria SAR (InSAR)

El principi de la *interferometria per radar d'obertura sintètica* o InSAR, acrònim de l'anglès per **Interferometric Synthetic Aperture Radar**, és la de mesurar les diferències de fase d'un parell de senyals, **master** i **slave**, que s'envien i retornen entre un satèl·lit i una mateixa superfície terrestre. Aquesta diferència pot ser produïda pel pas de dos radars ubicats en dos satèl·lits diferents (cadascú en el angle de visió segons la seva trajectòria) que transmeten sobre la mateixa zona, o per un mateix satèl·lit en dues passades per la mateixa zona en moments diferents i amb una lleugera variació de l'angle de visió. Aquest últim és el cas pels satèl·lits ERS-1, ERS-2 i Envisat que tenen uns intervals de temps entre observacions d' 1 dia, 35 dies o qualsevol múltiple de 35 dies.

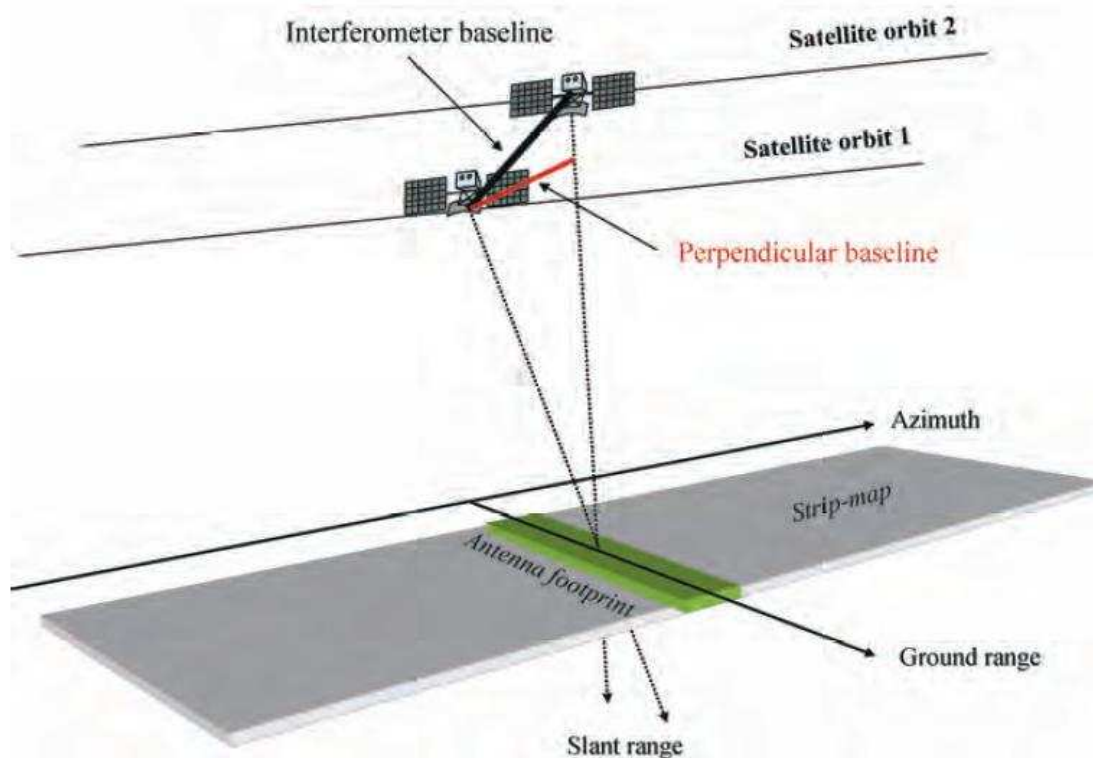


Fig. 1.2 Geometria en un sistema InSAR

La distància entre els dos satèl·lits (o òrbites) en el pla perpendicular a l'òrbita s'anomena **interferometric baseline** i la seva projecció perpendicular al **slant range** rep el nom de **perpendicular baseline**.

L'interferograma es genera al multiplicar píxel per píxel la primera imatge SAR (imatge **master**) amb el complex conjugat de la segona (imatge **slave**). Així, l'amplitud del interferograma és l'amplitud de la primera imatge multiplicada per la de la segona, i la seva fase, fase interferomètrica, és la diferència de fases de les imatges.

Per il·lustrar-ho, suposem que només tenim un punt de reflexió (dispersor) dominant en cada cel·la de resolució del sòl i que aquest no canvia amb el temps. Aquest dispersor és observat per dos SARs amb angles de visió lleugerament diferents (Fig. 1.3). En aquest cas, la fase interferomètrica de cada píxel de la imatge SAR dependrà només de la diferència en les trajectòries de viatge de cada un dels dos SAR. Qualsevol possible contribució de la fase introduïda pel dispersor no afectarà a la fase interferomètrica, ja que es cancel·la per la diferència. Una vegada el punt de referència del sòl ha estat identificat, la diferència en la variació de la trajectòria del viatge Δr que resulta de passar d'una cel·la de resolució de referència a una altra es pot donar amb una senzilla expressió (una aproximació que funciona per petites **baselines** i cel·les de resolució que no estiguin massa allunyades entre si) que depèn d'uns pocs paràmetres geomètrics (Fig. 1.3).

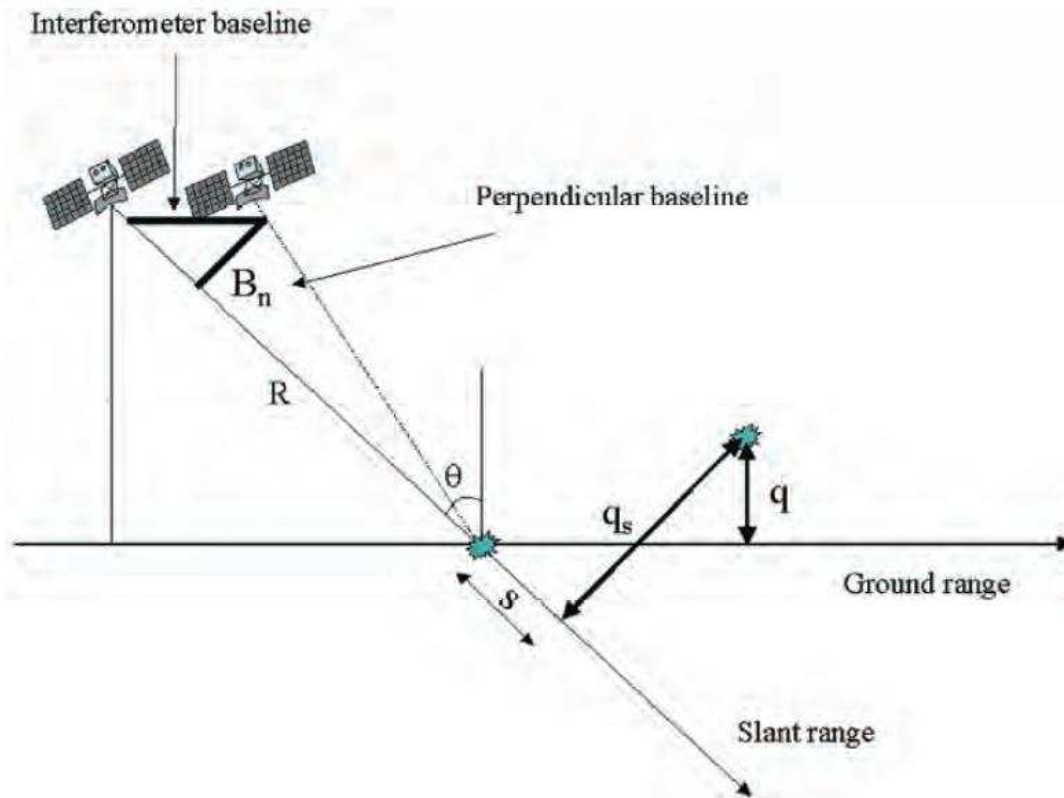


Fig. 1.3 Geometria en un sistema InSAR

On els paràmetres son:

- B_n – **Baseline** perpendicular
- R – Distància del satèl·lit al blanc (superfície terrestre)
- q_s – Desplaçament de la cel·la de resolució respecte la perpendicular al **slant range**

L'expressió aproximada de Δr seria:

$$\Delta r = 2 \cdot \frac{B_n \cdot q_s}{R} \quad (1.3)$$

La variació de la fase interferomètrica $\Delta\phi$ és proporcional a Δr dividit per la longitud d'ona transmesa λ .

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot q_s}{R} \quad (1.4)$$

Ara bé, aquesta variació de la fase interferomètrica es pot dividir en dues contribucions:

- Una variació de fase proporcional a la diferència d'alçada q del blanc, referit al pla horitzontal de referència (topografia)
- Una variació de fase proporcional al desplaçament **slant range** s del blanc (component del moviment)

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot q}{R \cdot \sin \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot s}{R \cdot \tan \theta} \quad (1.5)$$

On el paràmetre θ és l'angle d'incidència del raig amb respecte a la referència.

Cal assenyalar que la perpendicular del **baseline** es pot conèixer amb precisió per les dades orbitals, i que el terme de la segona fase es pot calcular i s'ha de restar a la fase interferomètrica. Aquesta operació s'anomena *aplanament d'interferograma* o *interferograma aplanat* (**interferogram flattening**) i, en conseqüència, genera un mapa de fase proporcional a l'alçada relativa del terreny. En aquest mapa, la diferència d'alçada entre dues discontinuïtats s'anomena *altitud d'ambigüitat* h_a i es pot calcular.

Així, l'*altitud d'ambigüitat* s'ha definit com la diferència d'alçada que genera un canvi de fase interferomètrica de 2π després de realitzar un *aplanament de l'interferograma*. Aquesta *altitud d'ambigüitat* és inversament proporcional al **baseline**:

$$\Delta h_a = \frac{\lambda \cdot R \cdot \sin \theta}{2B_n} \quad (1.6)$$

Aquest *interferograma aplanat* proporciona una mesura ambigua d'alçada relativa del terreny degut a la naturalesa cíclica 2π de la fase interferomètrica. La variació de fase entre dos punts en aquest interferograma proporciona una mesura de la variació en l'alçada, després d'eliminar qualsevol nombre sencer de l'*altitud d'ambigüitat* (equivalent a un nombre sencer de 2π cicles de fase). El procés d'afegir el correcte múltiple sencer de 2π al marge interferomètric s'anomena *desenrotllament de fase* (**phase unwrapping**).

Ara bé, s'haurien d'afegir un parell de components en la fase interferomètrica:

- La component atmosfèrica: Quan dues imatges InSAR no són simultànies, la radiació de cadascuna d'elles per diferents rutes, poden veure's afectades de manera diferent per l'atmosfera (veure [3]). Diferències en la humitat atmosfèrica, en la temperatura i en la pressió en cada cas pot tenir una conseqüència visible en la fase interferomètrica. Aquest efecte està limitat, en

general, dins de 2π de pic a pic en un canvi de fase interferomètrica al llarg de la imatge amb una bona variabilitat espacial (des d'uns pocs centenars de metres a uns pocs quilòmetres). L'efecte d'aquesta contribució influeix en ambdues altituds (sobretot en el cas de les petites **baselines**) i en les mesures de la deformació del terreny.

- El soroll de fase: Aquest és un paràmetre intrínsec a qualsevol senyal electromagnètic i per tant, va adjunt amb el senyal, es a dir, forma part del senyal. El soroll de fase pot ser estimat mitjançant la coherència γ d'un parell d'imatges interferomètriques. Així, la coherència local és el coeficient de correlació d'un parell d'imatges SAR creuades o sobreposades sobre una finestra petita (uns pocs píxels en **range** i en **azimuth**), una vegada que tots les components deterministes de la fase (principalment degut a l'elevació del terreny) s'hagin compensat. En definitiva, el soroll s'ha de modelar (veure [4]). No s'entrarà en l'anàlisi d'aquest paràmetre (podria ser un projecte per si sol) però, es tracta d'un paràmetre que es té en compte alhora de fer el procés interferomètric.

Així, la fase interferomètrica SAR es pot dir que esta formada per la suma de les fases degudes a la topografia ϕ_{Topo} , a la component del moviment ϕ_{Mov} , a la component atmosfèrica ϕ_{Atm} i al soroll de fase ϕ_{Soroll} .

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{InSAR}} = \phi_{\text{Topo}} + \phi_{\text{Mov}} + \phi_{\text{Atm}} + \phi_{\text{Soroll}} \quad (1.7)$$

1.3. Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)

Abans d'introduir la tècnica DInSAR, s'ha d'explicar que són els *models digitals del terreny* o *models d'elevació digital*, ja que aquests són la clau d'aquesta tècnica.

1.3.1. Models digitals del terreny

Els *models digitals del terreny* o *models d'elevació digital*, traducció al català per **Digital Terrain Model** (DTM) i **Digital Elevation Model** (DEM) respectivament, són la representació digital dels valors de l'altura del terreny.

En aquest projecte ens referirem als *models digitals del terreny* amb l'acrònim de l'anglès DEM per **Digital Elevation Model**, que és el més usat en el camp de la interferometria en l' Institut Geomàtic.

Hi ha diferent mètodes per a la seva generació com altímetres, GPS, estacions topogràfiques, restitució fotogramètrica, radargrametria. La tècnica i mètode usat determinen la resolució i precisió del DEM.

1.3.2. Tècnica DInSAR

La tècnica DInSAR, acrònim de l'anglès per **Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar** que traduït al català seria *interferometria diferencial de radar d'obertura sintètica*, no és més que una millora en la tècnica InSAR, es a dir, es continua volen detectar i mesurar moviments molt petits de la superfície, mitjançant la producció de interferogrames, però, en aquest cas el que s'ha afegit és que se'ls ha extret els efectes de la topografia del terreny o el que també s'anomena la contribució topogràfica. L'extracció d'aquest senyal topogràfic es realitza basant-se en un DEM.

Suposem que alguns dels punts reflectits sobre el terreny canvien lleugerament la seva posició relativa d'interval de temps entre dues observacions SAR (com, per exemple, en cas d'enfonsaments, esclavissades de terra, terratrèmols, etc.) En aquests casos, el següent terme addicional de la fase, independentment del **baseline**, apareix en la fase interferomètrica:

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d \quad (1.8)$$

On el paràmetre d és el desplaçament relatiu de la reflexió projectat en la direcció **slant range**.

Això significa que després del *interferograma d'aplanament*, la fase interferomètrica conté les contribucions de l'altitud i del moviment:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot q}{R \cdot \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d \quad (1.9)$$

Llavors, si un DEM està disponible, la contribució en altitud es pot restar de la fase interferomètrica, generant així l'*interferograma diferencial (differential interferogram)*. Amés a més, la component del moviment del terreny es pot mesurar.

Per tant, es pot definir la fase interferomètrica diferencial com la suma de les fases degudes al error topogràfic $\phi_{ErrorTopo}$, a la component del moviment del terreny ϕ_{Mov} , a la component atmosfèrica ϕ_{Atm} i al soroll ϕ_{Soroll} .

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{dif} = \phi_{ErrorTopo} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Soroll} \quad (1.10)$$

1.4. Interferometria diferencial SAR avançada

La interferometria diferencial SAR avançada (ADInSAR) fa referència a les millores que s'han anat proposant i desenvolupant en el camp del DInSAR per a la mesura de subsidències amb l'objectiu de reduir al màxim tots els errors produïts en la fase en el transcurs del temps, per tal de reduir al màxim els errors en la mesura.

D'avenços hi ha hagut de diversos tipus. Per exemple, a l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) és va desenvolupar un programa informàtic anomenat DISICC (***Differential Interferometry SAR ICC***). A nivell genèric, el que es pretén amb aquest software és reduir al màxim totes les influències atmosfèriques i els errors topogràfics (veure [5]).

Un altre exemple és la tècnica PSI (veure [6]). Aquesta tècnica és la que s'usarà en aquest projecte, especialment en l'estudi pràctic que veurem en el tercer capítol. Però, abans veurem en que consisteix.

1.4.1. Tècnica PSI

Les sigles PSI són l'acrònim per la terminologia anglesa ***Persistent Scatterers Interferometry***, que en aquest treball s'ha traduït com *Punts Interferomètrics Permanents*.

Aquesta tècnica, que és un desenvolupament de la tècnica DInSAR, es basa en l'estudi de píxels que es mantenen a través d'una seqüència coherent d'interferogrames. Es tracta d'un nou enfocament de les imatges múltiples (***multi-look***) en la que es busca, en aquesta pila d'imatges, objectes sobre el terreny que proporcionin coherència i estabilitat en les reflexions que tornen al radar. Aquests objectes poden ser la mida d'un píxel o, més comunament de mida sub-píxel, i estan presents en cada imatge a la pila.

Normalment, aquesta tècnica és molt útil en les zones urbanes amb una gran quantitat d'estructures permanents. Ara també és molt útil en altres zones que en principi no tenen una bona reflexió de la senyal, com poden ser aquelles amb molta vegetació, si s'ubiquen reflectors artificials (***corner reflectors***) ja que aquests poden retornar el senyal amb una alta coherència i estabilitat i per tant, es poden obtenir uns resultats sobre la subsidència del sòl molt més acurats.

CAPÍTOL 2. PROCÉS INTERFEROMÈTRIC

2.1. Descripció general

El procés interferomètric és el procés que va des de l'adquisició de les imatges captades per satèl·lit, la generació de les imatges interferomètriques (interferogrames), la seva elaboració, fins l'obtenció dels resultats. Tot aquest procés també rep el nom de cadena interferomètrica.

Aquesta cadena interferomètrica pot variar segons la manera de dividir el procés interferomètric. Així, aquest procés es pot dividir en tants punts com l'equip que realitza l'estudi cregui convenient. No és estrany doncs, que segons l'equip amb el que es treballi, la cadena pot estar dividida en més o menys punts i aquestes poden rebre diferents noms i incloure, aparentment, termes nous però, de fet, són canvis petits. Sí, perquè malgrat la terminologia que en cada cas es pugui usar la cadena interferomètrica és bàsicament la mateixa. Ara bé, no es l'objectiu d'aquest treball discutir o qüestionar aquest punt. De fet, això, no només li dona certa originalitat sinó que, a més a més, mostra que es tracta d'una estructura oberta el que pot facilitar el seu desenvolupament. Senzillament, el que es vol és exposar el que ens hem trobat a mesura que anàvem avançant en el tema.

Com que el present treball s'ha realitzat en la Unitat de Teledetecció (UT) de l'Institut de Geomàtica (IG), es farà un breu resum general de la cadena interferomètrica que aquesta unitat de l'IG usa. Aquesta es divideix en tres blocs:

– Bloc I

El principi de tot el procés consisteix en l'adquisició de les imatges de satèl·lit que es volen processar mitjançant la seva compra. En aquest treball s'han usat imatges adquirides pel satèl·lit Envisat.

Un cop adquirides les imatges, aquestes es correlacionen, es generen els interferogrames, així com els mapes d'amplitud (AM) i els mapes de dispersió (DA).

En aquest treball aquest procés no s'ha efectuat directament, sinó que s'han aprofitat unes imatges i els seus respectius interferogrames que l'IG ja havia generat mitjançant un programa anomenat DIAPASON, desenvolupat pel CNES (Agència Espacial Francesa).

– Bloc II

Aquest bloc es divideix en els següents punts:

- La selecció dels píxels d'interès amb la estimació de l'error topogràfic i la velocitat lineal de deformació en les fases enrotllades¹ d'un bloc d'interferogrames diferencials. Aquest procés es realitza mitjançant programes, que diversos membres de la Unitat de Teledetecció de l'IG han realitzat, i es divideix en:

¹ Fins el punt actual la fase està enrotllada, es a dir, té naturalesa cíclica acotada entre π i $-\pi$

1. Càlcul de la velocitat lineal diferencial i l'error topogràfic diferencial.
 2. Construcció d'una xarxa connectada d'arestes.
 3. Reconstrucció de la velocitat lineal i l'error topogràfic sobre un grup de píxels.
- Es genera un mapa de la gamma, es a dir, la coherència local o coherència γ . S'ha de tenir en compte, que aquest és el criteri de selecció per les arestes en les que es construeix la xarxa que s'ha vist en el punt anterior.
 - Es generen els interferogrames sense la component lineal del moviment de deformació ni la component de fase de l'error topogràfic. Es a dir, el que es podria anomenar els residus dels càlculs de la velocitat lineal diferencial i de l'error topogràfic diferencial.
 - Posteriorment es realitza un dels passos més crítics, el desenrotllament (o desenvolupament) de la fase. Fins el moment, tenim la fase enrotllada en un número de cicles entre $-\pi$ i π , i el que es vol en aquest procés és recuperar el número de cicles.
 - A continuació vindria el punt on el que es fa és comparar els interferogrames entre ells en termes de diferències de fase.
 - El següent pas consisteix en transformar les fases interferomètriques en fases d'imatge, i corregir els errors del desenrotllament de la fase.
 - L'estimació del terme lineal i la seva sostracció de les imatges.
 - Els càlculs de la component atmosfèrica aplicant filtres passa alt i passa baix per les diferents capes de l'atmosfera.
 - Càlcul de les fases d'imatge sense la contribució del terme lineal. És a dir, els residus de l'estimació del terme lineal.
 - Geocodificació de les imatge amb la matriu de la velocitat i de l'error topogràfic.

– Bloc III

Aquest tercer bloc es pot usar de ser necessari. Es tracta de segones iteracions del bloc II i d'un punt o procés opcional, la densificació.

Per resumir aquest tercer bloc esquemàticament:

- Una segona iteració de la selecció dels píxels d'interès amb la estimació de l'error topogràfic i la velocitat lineal de deformació.
- Una segona iteració per generar un nou mapa de la coherència local o gamma.
- Opcionalment, en aquest punt es podria fer una densificació dels punts permanents.
- Una segona iteració on es generen els interferogrames sense la component lineal del moviment de deformació ni la component de fase de l'error topogràfic.
- Una segona iteració pel desenrotllament de la fase.
- Una segona iteració per a comparar els interferogrames entre ells en termes de diferències de fase.
- Una segona iteració per transformar les fases interferomètriques en fases d'imatge.
- Una segona iteració per la geocodificació.

2.2. Procés interferomètric en l'estudi pràctic de subsidència

Com s'ha pogut observar en el punt anterior, la cadena interferomètrica és molt completa i molt útil per l'anàlisi dels resultats. Ara bé, per un neòfit, a primera vista queda clar que es tracta d'un procés ferragós, bastant pesat. A més a més, certs punts del procés interferomètrics són invisibles a l'usuari ja que estan encadenats informàticament i el que s'obté són els resultats en un dels punts següents.

Per tant, en el present capítol ens centrarem en explicar quatre punts principals des del punt de vista del present projecte i que pretenen donar una imatge general de tot el procés. Aquest punt són:

1. L'adquisició de les imatges i la generació dels interferogrames
2. L'estimació de l'error topogràfic i la velocitat lineal de deformació
3. El desenrotllament de la fase

Finalment, s'obtingueran uns resultats i aquests s'analitzaran en el següent capítol, en un estudi pràctic de subsidència ocorreguda en una zona d'un barri de la ciutat de Barcelona.

2.2.1. Adquisició d'imatges i generació de interferogrames

Com ja s'ha comentat, aquest punt del procés no s'ha realitzat en aquest projecte doncs s'han aprofitat imatges captades des del satèl·lit Envisat que l'Institut de Geomàtica (IG) ja havia adquirit, junt amb les imatges interferomètriques (interferogrames) que el mateix IG s'havia encarregat de generar. S'ha de tenir present que l'estudi pràctic s'ha basat en una part dels resultats de mesures terrestres obtinguts entre els anys 2004 a 2007, raó per la qual les imatges amb les que es precisava treballar havien de ser del mateix període temporal les obtingudes durant aquells anys.

De totes maneres, i malgrat no haver treballat de manera pràctica en aquest punt, es farà una explicació teòrica de com es desenvolupa.

S'han usat imatges interferomètriques generades a partir d'imatges captades pel satèl·lit Envisat. L'adquisició de les imatges d'aquest satèl·lit es fa mitjançant la compra de les mateixes a l'Agència Espacial Europea (ESA).

Aquest procés es pot fer directament des d'Internet. Hi ha varis softwares que permeten la descàrrega de les imatges que i el període que es vol analitzar. A manera d'exemple, citarem dos dels softwares que es pot usar i del website on els podem descarregar:

- **DESCW** (*Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows*) és una eina de software amb funció de missió múltiple creada per permetre

visualitzar els satèl·lits d'observació de la Terra (ERS-1, ERS-2, LANDSAT-5, LANDSAT-7, JERS-1, TERRA / MODIS i ENVISAT) que cobreixen tot el mapa terrestre.

Website on es pot descarregar: <http://earth.esa.int/descw/>

- **EOLI-SA (*Earth Observation Link – Stand Alone*)** és una eina interactiva de plataforma múltiple lliure que permet als usuaris accedir als catàlegs d'Observació de la Terra de l'ESA. A més a més, ofereix una sèrie de funcions especialitzades com podria ser en el nostre cas, les consultes d'interferometria SAR.

Website on descarregar: <http://eoli.esa.int/geteolisa/WebInstallers/install.htm>

Un cop adquirides aquestes imatges s'ha de correlacionar i generar els interferogrames. S'usa un programa anomenat DIAPASON per desenvolupar aquest pas. Aquest no només correlaciona les imatges i genera els interferogrames diferencials sinó que a més a més genera un mapa de coherència.

De fet, DIAPASON (*Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey Of Nature*) desenvolupat pel CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) es a dir, l' Agència Espacial Francesa, és un *software* per a aplicacions InSAR relacionades amb la detecció de canvis i de moviments del terreny en grans àrees. Des de l'any 2000, l'empresa Altamira Information S.L., amb seu social a Barcelona, és l'encarregada dels seu manteniment i distribució arreu del món.

Es pot observar, que en el cas de l'IG, aquest punt normalment es realitza mitjançant *software* comercial extern.

2.2.2. Estimació error topogràfic i velocitat lineal de deformació

L'objectiu d'aquest punt del procés és fer una estimació de l'error topogràfic i la velocitat lineal de deformació d'una pila de fases enrotllades d'interferogrames diferencials.

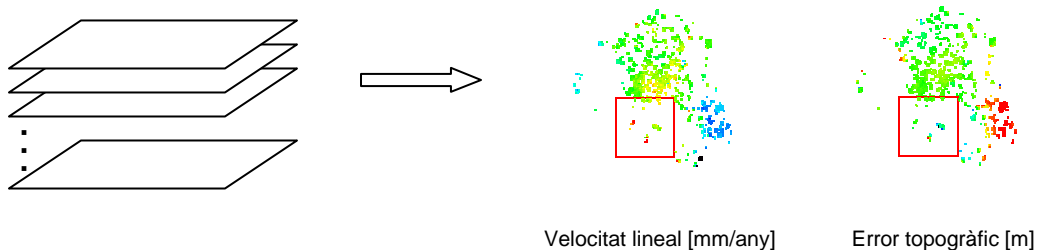


Fig. 2.1 Pila de fases enrotllades d'interferogrames diferencials

En aquest punt se'ns presenta l'algoritme usat en el model de càlcul.

Com s'ha comentat tindrem dos processos interferomètrics ja que un d'ells seguirà l'algoritme que a continuació s'explica i un altre procés que realitzarà una petita variació en aquest algoritme i que s'explicarà en l'estudi pràctic.

A la Unitat de Teledetecció de l' IG s'usa un algoritme (veure [7]) que es divideix en tres subprocessos, els quals reben els següents noms:

1. Etopo_Vellin
2. Reordenació
3. Integració

Cadascú dels quals ha estat desenvolupat per diferents membres de la UT de l'IG, i el formen un conjunt de **scripts**, programes i subrutines per tal de complir l'objectiu de cada subprocés. Però, analitzem-ho amb una mica amb més de detall.

2.2.2.1. Etopo_Vellin

Aquest a la seva vegada es divideix en quatre passos:

Pas 1: La selecció dels píxels d'interès. Es pretén així garantir una bona qualitat de les fases d'entrada, descartant el píxels dolents per motius de soroll de fase. Si els interferogrames usats tenen la resolució màxima del SAR, llavors la millor selecció seguirà el criteri de la dispersió d'amplitud. Si els interferogrames estan comprimits (**multi-look images**) s'aplicarà el criteri de la coherència.

Pas 2: La connexió dels píxels. Com a resultat del pas anterior s'obté un paquet irregular de píxels. Com la informació continguda en la fase diferencial PSI (DInSAR) només es pot tractar tenint en compte parells dels píxels abans obtinguts, aquests han d'estar connectats en arestes, calculant la diferència de fase de cada aresta. Aquestes arestes han de ser el més curtes possibles per tal de minimitzar els efectes atmosfèrics en la diferència de fase. A l' IG s'usen diversos mètodes per connectar aquest paquet irregular de punts depenen la manera en que es volen generar les arestes. En aquest treball s'usarà el mètode que s'anomena de *primer ordre*, on tots el píxels d'una àrea d'estudi estan connectats tots entre si per tal de generar el número màxim d'arestes.

Pas 3: El càlcul de la diferència de fase. S'assigna un valor a cada fase enrotllada diferencial per cada aresta i per cada interferograma, obtenint així per a cada aresta una pila de N fases enrotllades interferomètriques diferencials.

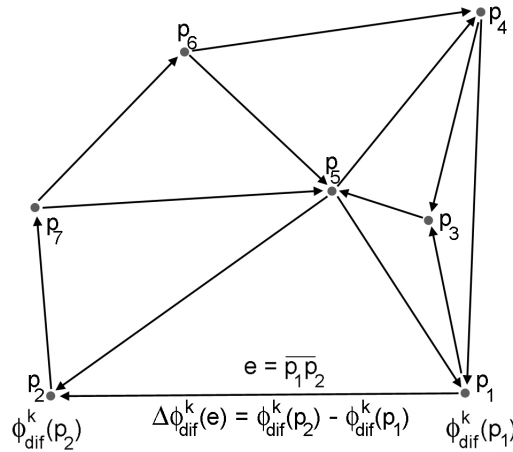


Fig. 2.2 Connexió de píxels

On a cada aresta $e = \overline{p_1 p_2}$ s'aplica la diferència de fases enrotllades sobre p_1 i p_2 .

Pas 4: Estimació de la velocitat lineal de deformació i l'error topogràfic. Aquests valors diferencials es calculen sobre cada aresta mitjançant l'ús de N fases enrotllades diferencials i paràmetres geomètrics de cada interferograma.

Per a cada aresta e es vol obtenir:

- una velocitat diferencial $\Delta v(e)$
- un error topogràfic diferencial $\Delta te(e)$

amb l'objectiu de minimitzar la funció $\Delta \mathcal{E}^k(e)$

$$\Delta \mathcal{E}^k(e) = \Delta \phi_{\text{obs}}^k(e) - \Delta \phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e)) \quad (\text{Mode } 2\pi) \quad (2.1)$$

On:

- $\Delta \phi_{\text{obs}}^k(e)$ és la fase enrotllada diferencial de l'aresta e_i i interferograma k
- $\Delta \phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e))$ és la fase diferencial modelada que segueix la següent funció:

$$\Delta \phi_m^k(\Delta v(e), \Delta te(e)) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta T^k \Delta v(e) + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^k}{R^k \sin \theta^k} \Delta te(e) \quad (2.2)$$

On:

- $\Delta v(e)$ i $\Delta te(e)$ són les incògnites associades a l'aresta e
- ΔT^k i B_{\perp}^k són les **baselines** temporal i normal de l'interferograma k
- R^k i θ^k són els principals **slant range** i **angle d'incidència** de l'interferograma k
- λ és la longitud d'ona

Cal destacar que en aquesta última equació (2.2) es considera un model de deformació del terreny lineal. Depenen de l'evolució temporal de deformació que s'espera, es podrien escollir models més complexos.

Per tal de trobar les incògnites associades $\Delta v(e)$ i $\Delta te(e)$ es maximitza la següent funció:

$$\gamma(e) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \left(j \cdot \left(\Delta \phi_{obs}^K(e) - \Delta \phi_m^K(\Delta v(e), \Delta te(e)) \right) \right) \quad (2.3)$$

On N és el número d'interferogrames i γ (gamma) fa referència a la coherència.

En aquest treball, i seguint el mètode que usa l'IG, s'estableix que:

1. Aquesta última funció de maximització (veure fórmula (2.3)) es realitza numèricament.
2. Per tal de trobar els valors de $\Delta v(e)$ i $\Delta te(e)$ que donen el màxim $\gamma(e)$, s'usa una xarxa o graella (veure Fig. 2.3).
3. Per a cada aresta el seu màxim és usat per avaluar la bondat d'ajust del model amb el conjunt donat de fases enrotllades (observacions).

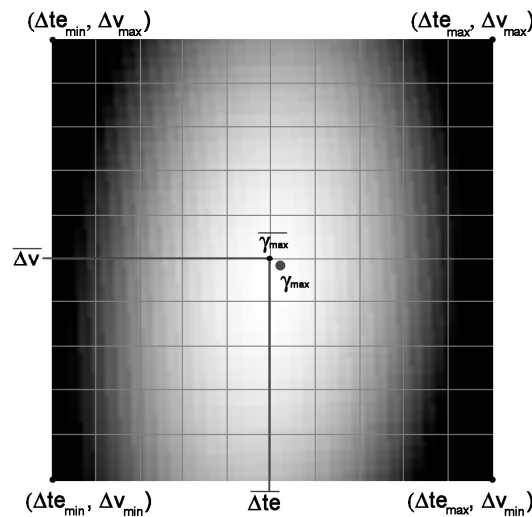


Fig. 2.3 Estimació de la velocitat diferencial i l'error topogràfic diferencial

Per a cada aresta, γ és una funció que depèn de les variables Δv i Δte . Per trobar el valor màxim de γ es proven diversos parells $(\Delta te, \Delta v)$, on es demostra que $\Delta te \in [\Delta te_{\min}, \Delta te_{\max}]$ i $\Delta v \in [\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max}]$. Els valors estimats $(\overline{\Delta te}, \overline{\Delta v})$ es donen per la parella que dona el màxim valor de γ . Aquesta solució no dona exactament

el màxim absolut γ_{\max} sinó la millor aproximació $\overline{\gamma_{\max}}$ a causa de la xarxa o graella discreta utilitzada.

Així, quant més densa és aquesta xarxa, millor és l'aproximació, però, a la vegada, més car és el temps de càlcul.

2.2.2.2. Reordenació

Tal com hem vist, en l'anterior subprocés s'ha obtingut un joc de píxels i d'arestes. Cada aresta té associat un cert valor gamma que indica la qualitat de la estimació tant de Δte com de Δv . Les arestes que tenen un valor de gamma baix no s'usen per la reconstrucció de te i de v per cada píxel.

Aquest subprocés es necessari per poder obtenir la xarxa de píxels connectada. A més a més, el resultats obtinguts en diferents tests es poden incloure en aquest subprocés.

2.2.2.3. Integració

El tercer i últim subprocés consisteix en la reconstrucció de la velocitat i l'error topogràfic dels píxels seleccionats usant els resultats obtinguts en les arestes. Això es fa mitjançant l'ajust del mínim quadrats, tenint en compte la velocitat lineal i l'error topogràfic en cada píxel com incògnites, i l'estimació de la velocitat diferencial i la topografia diferencial com observacions. Com més gran és la relació entre les arestes i els píxels, més fiables són els resultats de la integració. Atès que la integració només té valors diferencials, és necessari donar-li el valor de la velocitat d' almenys un píxel (punt de referència). El mateix s'ha de fer per l'error topogràfic. Els resultats d'aquest subprocés són un mapa de velocitats i un mapa d'error topogràfic, els valors són relatius al punt de referència escollit.

2.2.3. Desenrotllament de la fase

El desenrotllament de la fase és un dels punts més crítics i problemàtics en el procés interferomètric on no sempre és possible l'obtenció de resultats favorables. Zones amb baixa coherència i amb una topografia mal mostrejada poden arribar a ser zones on el desenrotllament de la fase presenti moltes dificultats.

Fins ara, tenim la fase enrotllada, la fase té una naturalesa cíclica que està acotada entre π i $-\pi$ o entre 0 i 2π . L'objectiu és recuperar el número de cicles de la mateixa.

Si la fase enrotllada és ϕ_{enr} , es pot expressar la fase desenrotllada (ϕ_{desenr}) com

$$\phi_{desenr} = n \cdot 2\pi - \phi_{enr} \quad (2.4)$$

On n serien el número de cicles.

Per a realitzar aquest punt del procés es defineixen dos grans blocs que agrupen les diferents tècniques de desenrotllat de la fase:

- Mètodes d'integració: Es tracta d' algoritmes que empren diferents camins de integració per obtenir el valor absolut de fase. Són especialment efectius per fer front a discontinuïtats però solen exigir una mínima qualitat de fase.
- Mètodes globals: Aquests mètodes tracten la imatge de forma global i proporcionen una solució proposada per un procés de minimització. Són menys complexos però especialment vulnerables a discontinuïtats. Acostumen a donar resultats no desitjats en cas d' aplicar-se en imatges amb variacions brusques. Exemples d' aquest tipus de mètodes són: l' algoritme del mínim quadràtic (**Least Minimum Square**, LMS), la seva variant el mínim quadràtic ponderat (WLMS) i el mètode de desenrotllant del gradient conjugat (CGM).

En aquest treball, s'ha usat el mètode global del mínim quadrat ponderat, i tot el punt del procés està inclòs en una cadena de **scripts** i programes que realitzen les operacions i càlculs adjacents de manera interna i també internament passen els resultats obtinguts al següent punt del procés.

CAPÍTOL 3. ESTUDI PRÀCTIC DE SUBSIDÈNCIA

3.1. Descripció general

En aquest capítol es farà un estudi de la subsidència ocorreguda en una àrea de la ciutat de Barcelona. Amb motiu del pas d'una tuneladora i per tal de controlar el possibles afectes en la superfície de la zona en qüestió es van realitzar una sèrie de mesures amb aparells terrestres. Així, es podrien mesurar les possibles subsidències en el sòl i el subsòl de la zona afectada per l'obra.

Aquests aparells terrestres de mesura s'han d'ubicar en el mateix lloc on es volen fer la mesura, es a dir, més distància o superfície es vulgui mesurar més aparells es necessiten, el que fa que els resultats obtinguts siguin una mica car. Això sí, la precisió és de l'ordre del mil·límetre.

Com es disposa dels resultats d'aquest estudi fet amb els aparells de mesura terrestre d'aquesta zona de Barcelona, mesures agafades entre els anys 2004 a 2007, s'ha usat aquesta àrea per fer un estudi comparatiu del model usat en el procés interferomètric, model que com s'ha vist en el capítol anterior és una equació funció de l'error topogràfic i la velocitat de moviment, amb el mateix model però, en aquest cas, l'equació només estarà en funció de l'error topogràfic, no es tindrà en compte la velocitat de moviment. Així, com disposem, a més a més, de les mesures fetes amb aparells terrestres es podrà comparar els resultats d'ambdós processos entre ells i amb els resultats obtinguts amb les mesures dels aparells terrestres.

Per aclarir una mica lo que s'ha comentat del canvi que es farà en l'equació del model, s'ha de recordar que s'assumeix en aquest (en el model):

- que les variacions en la fase enrotllada estan definides per l'error topogràfic i el moviment
- que la velocitat de variació és lineal

La estimació d'ambdós paràmetres, topografia i moviment (velocitat), es fa en el subprocés anomenat *Etopo_Vellin* i que s'ha explicat en el capítol anterior.

Per això, una de les qüestions a analitzar és els resultats que es poden obtenir si es canvia el model i es desestima la influència del moviment (velocitat) en la fase enrotllada. Ara aquesta és una petita part de l'anàlisi. Aquest es centrarà més en l'anàlisi dels resultats obtinguts mitjançant el procés interferomètric en comparació amb els resultats que es van obtenir amb les mesures terrestres, es a dir, amb els aparells de mesura terrestre.

3.2. Mesures terrestres (MT)

Tal com s'ha explicat en el punt anterior, en una zona d'un barri de la ciutat de Barcelona es van fer mesures amb aparells terrestres per controlar la possible subsidència del terra durant el pas d'una tuneladora i les obres relacionades amb la construcció del túnel.

Per aquest projecte s'ha disposat de les mesures amb aparells terrestres efectuades en 454 punts de la zona, entre els anys 2004 a 2007. Dels 454 punts, 18 presentaven les mesures en sèries temporals. Aquestes sèries voltaven les 1263 a 1403 mesures, les quals ens indicaven la variació el terreny en un punt concret durant tot un espai de temps. Es a dir, gairebé una mesura per dia. Ens centrarem doncs en aquests 18 punts.

Les dades que ens interessin d'aquests 18 punts són les que s'especifiquen a continuació:

Taula 3.1 Punts de les Mesures Terrestres (MT)

Nom Punt MT	Data inici	Data final	Núm. Mesures	Mesura (mm)
P01	20040628	20071218	1263	-57,78
P02	20040527	20071218	1296	-10,61
P03	20040628	20071218	1258	-40,05
P04	20040527	20071218	1296	-35,87
P05	20040527	20071218	1294	-13,86
P06	20040527	20071218	1238	-44,93
P07	20040527	20071218	1299	-43,60
P08	20040527	20071218	1296	-33,48
P09	20040527	20071218	1299	-20,75
P10	20040719	20071218	1247	-29,28
P11	20040211	20071218	1361	-16,33
P12	20040210	20071218	1388	-13,63
P13	20040210	20071218	1403	-12,40
P14	20040210	20071218	1392	-12,34
P15	20040210	20071218	1401	-12,80
P16	20040210	20071218	1403	-10,81
P17	20040416	20071218	1338	-3,55
P18	20040416	20071218	1337	-6,54

Com ja s'ha dit aquests punts tenen les seves respectives sèries temporals, de fet, en la columna anomenada **Num. Mesures** s'indica la quantitat de mesures que s'han fet en cada cas dins del període de temps comprés entre la **Data inici** i la **Data final**. Gairebé, surt a una mitjana de 1 mesura diària. En la

columna Mesura (mm) s'indica la subsidència total patida durant l'espai de temps mesurat.

També es pot observar que aquests 18 punts són punts crítics. De fet un d'ells té una subsidència de prop de 58 mm però, hi ha 3 punts entre els 40 i els 50 mm. És pot dir, que són punts crítics, o per aquest anàlisi són punts d'interès.

3.3. Anàlisi interferomètric

3.3.1 Imatges i interferogrames

Per l'anàlisi interferomètric del barri en qüestió, s'han usat 25 imatges de Barcelona i el Vallès, les quals s'han agafat amb el satèl·lit Envisat en les dates que s'especifiquen a continuació:

Taula 3.2 Imatges captades per satèl·lit amb les dates de la seva captació

Imatge	Data
1	20040319
2	20040423
3	20040528
4	20040702
5	20040806
6	20040910
7	20041015
8	20041119
9	20041224
10	20050408
11	20050513
12	20050617
13	20050722
14	20050826
15	20050930
16	20051104
17	20051209
18	20060217
19	20060324
20	20060428
21	20060707
22	20060811
23	20061020
24	20061124
25	20061229

Observis que la data de la imatge està en format americà, es a dir, any, mes i dia sense espai ni cap símbol de separació (AAAMMDD). Aquest format permet ordenar les dates de manera numèrica per ordre cronològic.

Aquestes 25 imatges captades pel satèl·lit han generat una xarxa de 169 interferogrames (Veure [Annex A]).

3.3.2 Mesures terrestres, punts referència i interferomètrics

Recordem que tenim 18 punts amb les mesures terrestres (MT) als que s'ha donat el nom de **P01**, **P02**, ... **P18**.

Com en aquest cas com no s'han trobat punts interferomètrics que coincidissin amb els punts de les mesures terrestres, s'ha aconseguit d'una altre projecte, que s'ha fet en l'IG paral·lel a aquest però, usant un espai temporal diferent, uns punts propers als de les MT. Aquests punts se'ls ha usat com a punts de referència (PR) i se'ls ha assignat el nom de **P01'**, **P02'**, ... **P18'**.

Cada punt o píxel té una mesura de 20 x 4 m, es tracta de punts o píxels amb una geometria rectangular. Aquest punts tenen la seva ubicació en una matriu on, com s'ha vist, la columna (X) és per **slant range** i la fila (Y) per **azimuth** (veure [Annex B]).

En la següent taula es mostra la relació dels punts de MT amb els PR i la ubicació d'aquests últims en el planell interferomètric.

Taula 3.3 Relació MT amb els PR i la ubicació d'aquests en el planell

Nom Punt MT	Nom PR	Columna (X)	Fila (Y)
P01	P01'	1464	3330
P02	P02'	1465	3318
P03	P03'	1465	3333
P04	P04'	1467	3317
P05	P05'	1468	3318
P06	P06'	1468	3318
P07	P07'	1471	3318
P08	P08'	1471	3318
P09	P09'	1474	3315
P10	P10'	1474	3315
P11	P11'	1478	3302
P12	P12'	1480	3299
P13	P13'	1481	3299
P14	P14'	1481	3295
P15	P15'	1481	3298
P16	P16'	1483	3289
P17	P17'	1486	3280
P18	P18'	1490	3294

De tots els punts obtinguts en el nostre procés s'han buscat els punts propers als punts que s'ha decidit usar com a punts de referència (veure [Annex C]). S'han treballat amb 33 punts propers als nostres 18 punts de referència. Per cada punt de referència, s'han buscat 4 punts dels obtinguts dels obtinguts en el procés. Com es pot veure, alguns dels 33 punts s'han usat per varis punts de referència. A aquests punts se'ls ha donat el nom de **I.001**, **I.002**, ... **I.033**.

Aquest punts també la seva ubicació en la matriu, es a dir, X per **slant range** i Y per **azimuth**. En la següent taula es mostren els 33 punts, la seva ubicació planell interferomètric i el número de cops que s'ha usat cada punt.

Taula 3.4 Punts del procés, la seva ubicació en el planell i numero d'usos

Nom Punts I	Columna (X)	Fila (Y)	Num. Usos
I.001	1459	3314	1
I.002	1459	3330	1
I.003	1459	3325	1
I.004	1461	3323	2
I.005	1463	3316	4
I.006	1463	3327	1
I.007	1463	3328	2
I.008	1465	3318	1
I.009	1465	3333	2
I.010	1466	3312	4
I.011	1467	3312	3
I.012	1468	3316	6
I.013	1469	3329	2
I.014	1475	3293	1
I.015	1475	3298	2
I.016	1475	3299	2
I.017	1476	3295	1
I.018	1476	3321	2
I.019	1477	3317	3
I.020	1478	3284	1
I.021	1479	3284	1
I.022	1479	3288	1
I.023	1479	3310	1
I.024	1480	3299	1
I.025	1480	3315	1
I.026	1481	3299	1
I.027	1482	3288	3
I.028	1482	3289	5
I.029	1483	3308	1
I.030	1486	3280	1
I.031	1487	3305	2
I.032	1490	3296	5
I.033	1491	3293	2

En la següent imatge (Fig. 3.1) es resumeix la relació dels punts del procés i la seva distància amb els punts de referència.

P01	≈	P01'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.002} \rightarrow 100,0 \text{ m} \\ \text{I.003} \rightarrow 102,0 \text{ m} \\ \text{I.007} \rightarrow 21,5 \text{ m} \\ \text{I.009} \rightarrow 23,3 \text{ m} \end{array} \right\}$		P10	≈	P10'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.012} \rightarrow 120,1 \text{ m} \\ \text{I.018} \rightarrow 46,6 \text{ m} \\ \text{I.019} \rightarrow 60,5 \text{ m} \\ \text{I.025} \rightarrow 120,0 \text{ m} \end{array} \right\}$
P02	≈	P02'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.004} \rightarrow 82,5 \text{ m} \\ \text{I.005} \rightarrow 40,8 \text{ m} \\ \text{I.008} \rightarrow 0,0 \text{ m} \\ \text{I.013} \rightarrow 91,3 \text{ m} \end{array} \right\}$		P11	≈	P11'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.015} \rightarrow 62,1 \text{ m} \\ \text{I.016} \rightarrow 61,2 \text{ m} \\ \text{I.023} \rightarrow 37,7 \text{ m} \\ \text{I.029} \rightarrow 102,8 \text{ m} \end{array} \right\}$
P03	≈	P03'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.006} \rightarrow 46,6 \text{ m} \\ \text{I.007} \rightarrow 44,7 \text{ m} \\ \text{I.009} \rightarrow 0,0 \text{ m} \\ \text{I.013} \rightarrow 81,6 \text{ m} \end{array} \right\}$		P12	≈	P12'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.024} \rightarrow 0,0 \text{ m} \\ \text{I.028} \rightarrow 56,6 \text{ m} \\ \text{I.031} \rightarrow 142,0 \text{ m} \\ \text{I.032} \rightarrow 200,4 \text{ m} \end{array} \right\}$
P04	≈	P04'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.005} \rightarrow 80,1 \text{ m} \\ \text{I.010} \rightarrow 28,3 \text{ m} \\ \text{I.011} \rightarrow 20,0 \text{ m} \\ \text{I.012} \rightarrow 20,4 \text{ m} \end{array} \right\}$		P13	≈	P13'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.022} \rightarrow 59,5 \text{ m} \\ \text{I.026} \rightarrow 0,0 \text{ m} \\ \text{I.027} \rightarrow 48,3 \text{ m} \\ \text{I.028} \rightarrow 44,7 \text{ m} \end{array} \right\}$
P05	≈	P05'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.001} \rightarrow 180,7 \text{ m} \\ \text{I.005} \rightarrow 100,3 \text{ m} \\ \text{I.011} \rightarrow 31,2 \text{ m} \\ \text{I.012} \rightarrow 8,0 \text{ m} \end{array} \right\}$		P14	≈	P14'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.014} \rightarrow 120,3 \text{ m} \\ \text{I.017} \rightarrow 100,0 \text{ m} \\ \text{I.028} \rightarrow 31,2 \text{ m} \\ \text{I.032} \rightarrow 180,0 \text{ m} \end{array} \right\}$
P06	≈	P06'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.010} \rightarrow 46,6 \text{ m} \\ \text{I.011} \rightarrow 31,2 \text{ m} \\ \text{I.012} \rightarrow 8,0 \text{ m} \\ \text{I.018} \rightarrow 160,4 \text{ m} \end{array} \right\}$		P15	≈	P15'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.015} \rightarrow 120,0 \text{ m} \\ \text{I.016} \rightarrow 120,1 \text{ m} \\ \text{I.028} \rightarrow 41,2 \text{ m} \\ \text{I.032} \rightarrow 180,2 \text{ m} \end{array} \right\}$
P07	≈	P07'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.005} \rightarrow 160,2 \text{ m} \\ \text{I.010} \rightarrow 102,8 \text{ m} \\ \text{I.012} \rightarrow 60,5 \text{ m} \\ \text{I.019} \rightarrow 120,1 \text{ m} \end{array} \right\}$		P16	≈	P16'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.022} \rightarrow 80,1 \text{ m} \\ \text{I.027} \rightarrow 20,4 \text{ m} \\ \text{I.032} \rightarrow 142,8 \text{ m} \\ \text{I.033} \rightarrow 160,8 \text{ m} \end{array} \right\}$
P08	≈	P08'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.005} \rightarrow 160,2 \text{ m} \\ \text{I.010} \rightarrow 102,8 \text{ m} \\ \text{I.012} \rightarrow 60,5 \text{ m} \\ \text{I.019} \rightarrow 120,1 \text{ m} \end{array} \right\}$		P17	≈	P17'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.020} \rightarrow 160,8 \text{ m} \\ \text{I.021} \rightarrow 140,9 \text{ m} \\ \text{I.027} \rightarrow 86,2 \text{ m} \\ \text{I.030} \rightarrow 0,0 \text{ m} \end{array} \right\}$
P09	≈	P09'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.012} \rightarrow 120,1 \text{ m} \\ \text{I.018} \rightarrow 46,6 \text{ m} \\ \text{I.019} \rightarrow 60,5 \text{ m} \\ \text{I.025} \rightarrow 120,0 \text{ m} \end{array} \right\}$		P18	≈	P18'	$\left\{ \begin{array}{l} \text{I.028} \rightarrow 161,2 \text{ m} \\ \text{I.031} \rightarrow 74,4 \text{ m} \\ \text{I.032} \rightarrow 8,0 \text{ m} \\ \text{I.033} \rightarrow 20,4 \text{ m} \end{array} \right\}$

Fig. 3.1 Relació MT amb PR i d'aquests amb els punts del procés interferomètric. També s'indica la distància PR als punts del procés.

3.3.3 Els resultats i la seva interpretació

Cal recordar que una part de l'estudi vol observar si fent un petit canvi en el procés interferomètric ajuda a millorar els resultats. Aquest canvi consisteix en realitzar el procés sense tenir en compte la velocitat en el subprocés que rep el nom *Etopo_vellin*. Es a dir, deixar aquesta variable a zero, de tal manera que el

procés tingui un grau de llibertat i veure si ens dona alguna avantatge especialment en els casos on es pot produir un graó en la subsidència.

Per tant, s'han realitzat dos "lançaments" del programa amb els 169 interferogrames. Un amb el procés interferomètric "clàssic" i l'altre amb la variació que s'acaba de comentar. Per diferenciar els processos, se'ls ha identificat amb els noms: *Amb velo* i *Sense velo*, respectivament.

Mitjançant el programa ENVI es poden visualitzar els punts obtinguts.

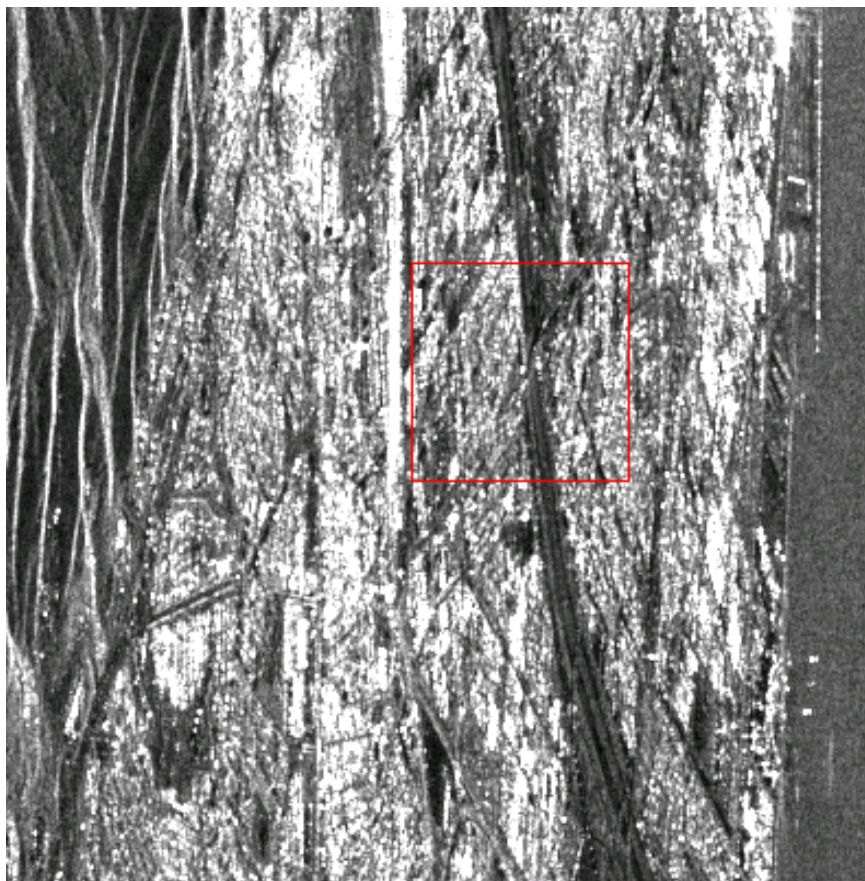


Fig. 3.2 Imatge en amplitud (AM) que inclou la zona d'estudi

Així per a cada procés s'han obtingut els següents resultats.

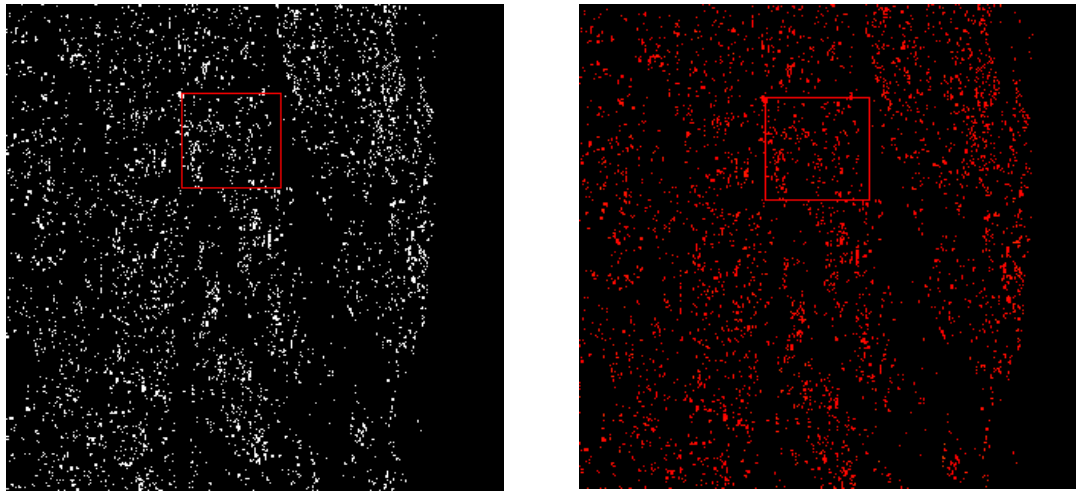


Fig. 3.3 Píxels o punts pels casos *Sense Velo* (esquerra) i *Amb Velo* (dreta)

Dels dos processos realitzats ens centrem en la zona que vorejava els 18 punts dels que teníem les mesures terrestres (MT), es a dir, on està el requadre vermell. A simple vista ja es pot observar més densitat de punts en el cas del procés *Sense Velo* que en el cas *Amb Velo*. Es a dir, on hi ha més densitat de punts es perquè el procés ha seleccionat més punts bons.

Els resultats obtinguts es representen gràficament. Per una banda, la gràfica del procés *Amb velo*. Per l'altra banda, la gràfica del procés *Sense Velo*.

La gràfica conte en l'eix d'abscisses les bandes, o imatges captades per satèl·lit, on cada una d'elles està relacionada amb una data, tal com, en la Taula 3.1, s'ha indicat. En l'eix d'ordenades s'indica la subsidència o variació del sòl, la unitat de mesura és el mil·límetre (mm). Amb això present, els resultats es mostren a continuació.

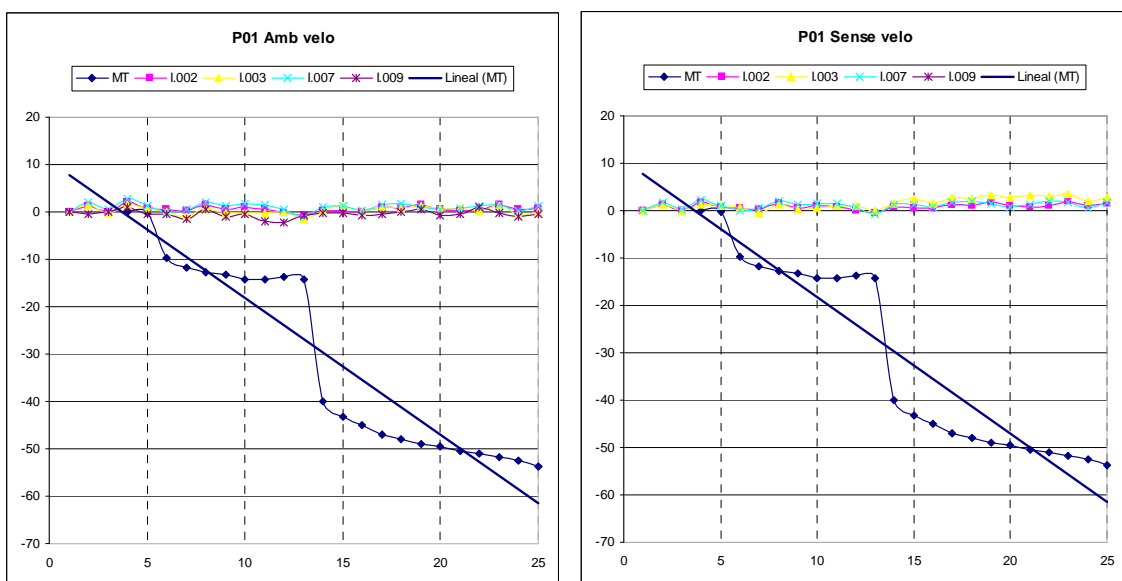


Fig. 3.4 Gràfiques del punt P01 i els punts interferomètrics propers

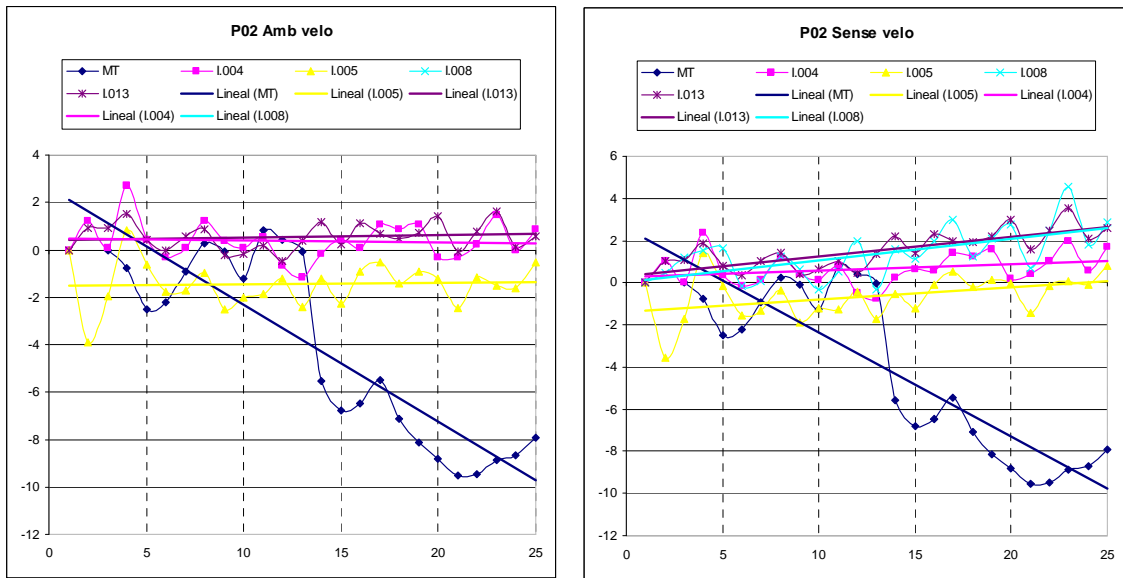


Fig. 3.5 Gràfiques del punt P02 i els punts interferomètrics propers

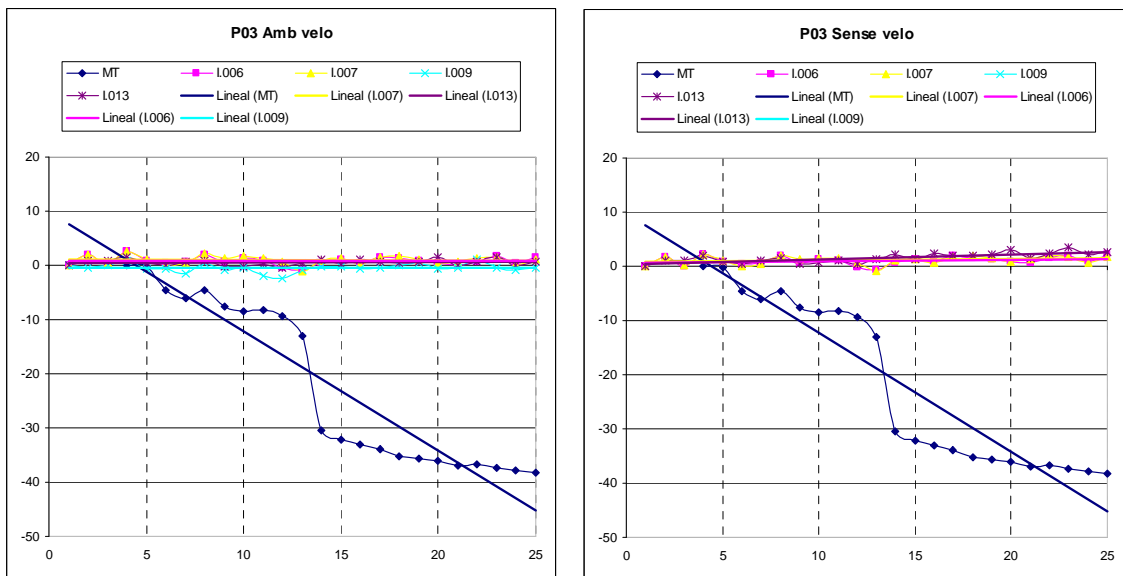


Fig. 3.6 Gràfiques del punt P03 i els punts interferomètrics propers

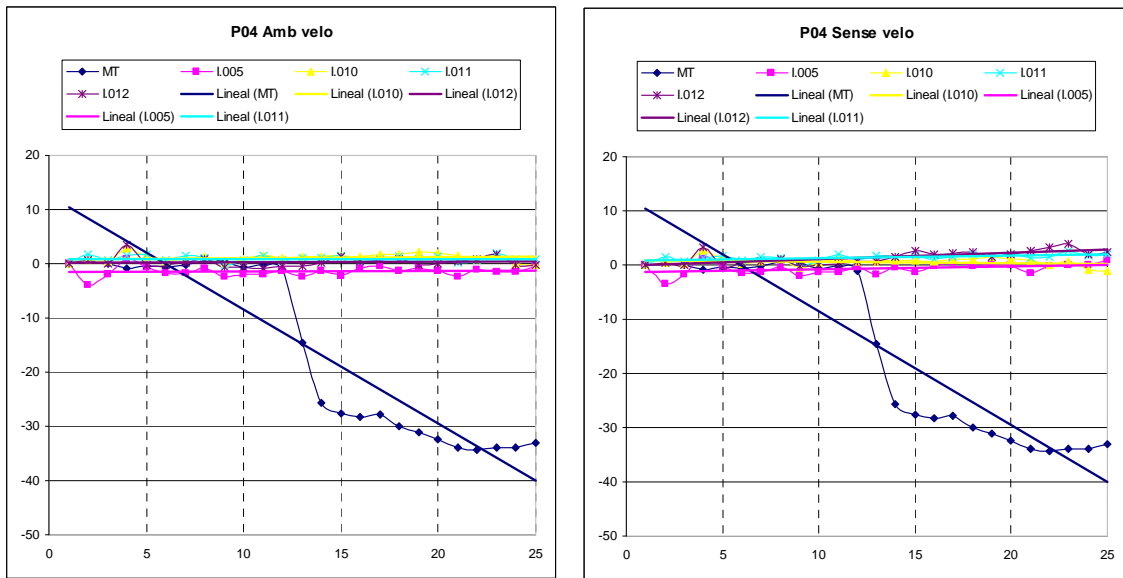


Fig. 3.7 Gràfiques del punt P04 i els punts interferomètrics propers

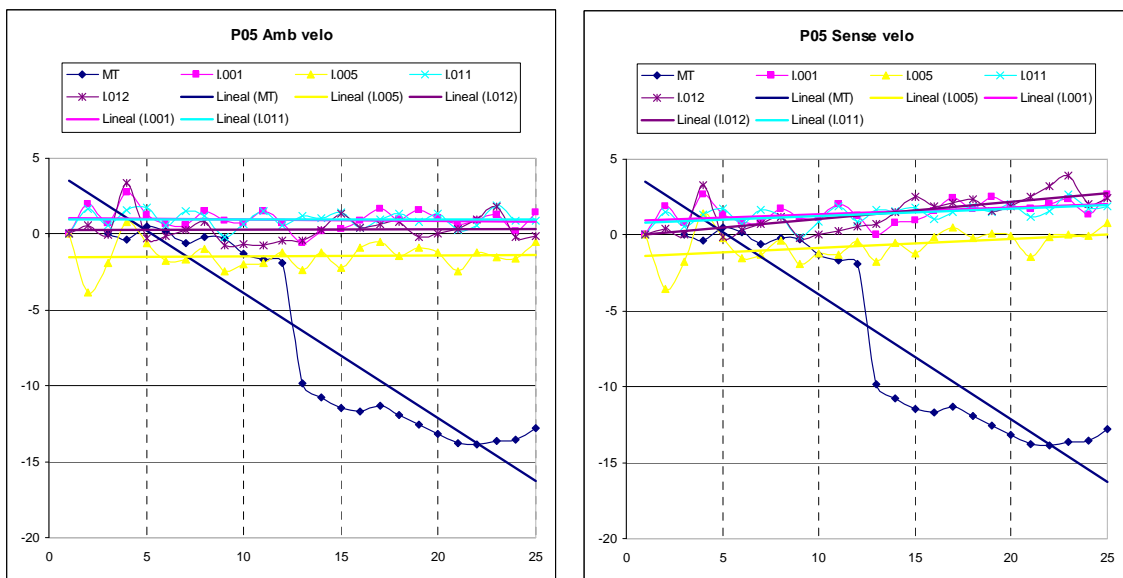


Fig. 3.8 Gràfiques del punt P05 i els punts interferomètrics propers

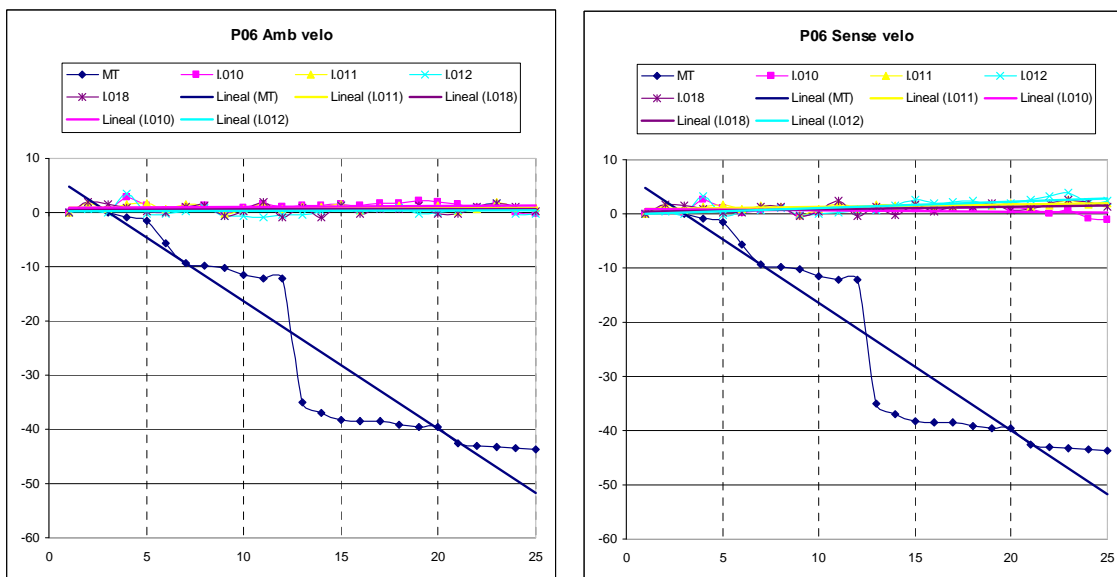


Fig. 3.9 Gràfiques del punt P06 i els punts interferomètrics propers

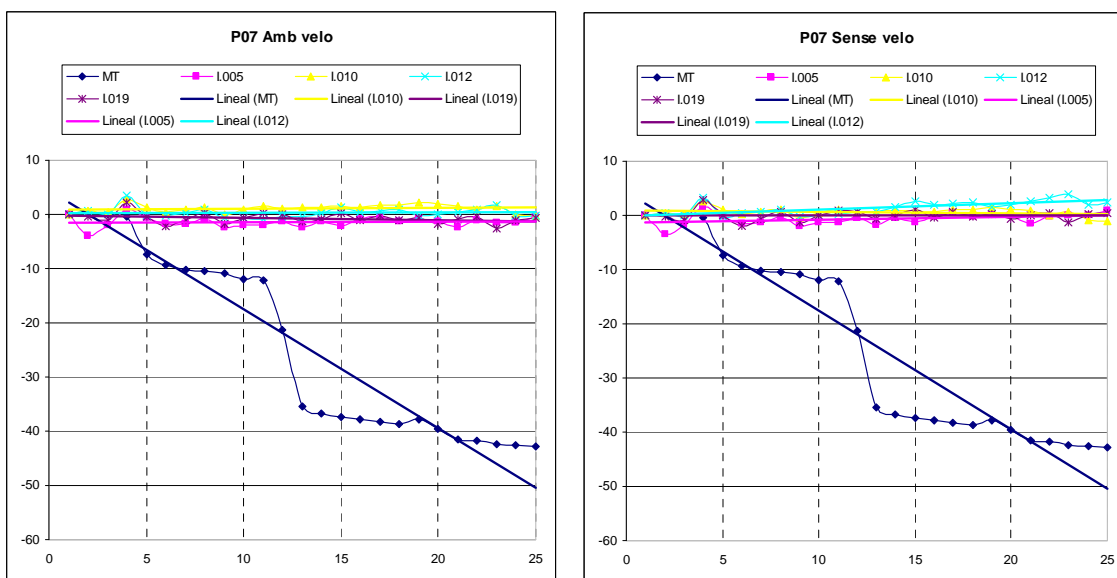


Fig. 3.10 Gràfiques del punt P07 i els punts interferomètrics propers

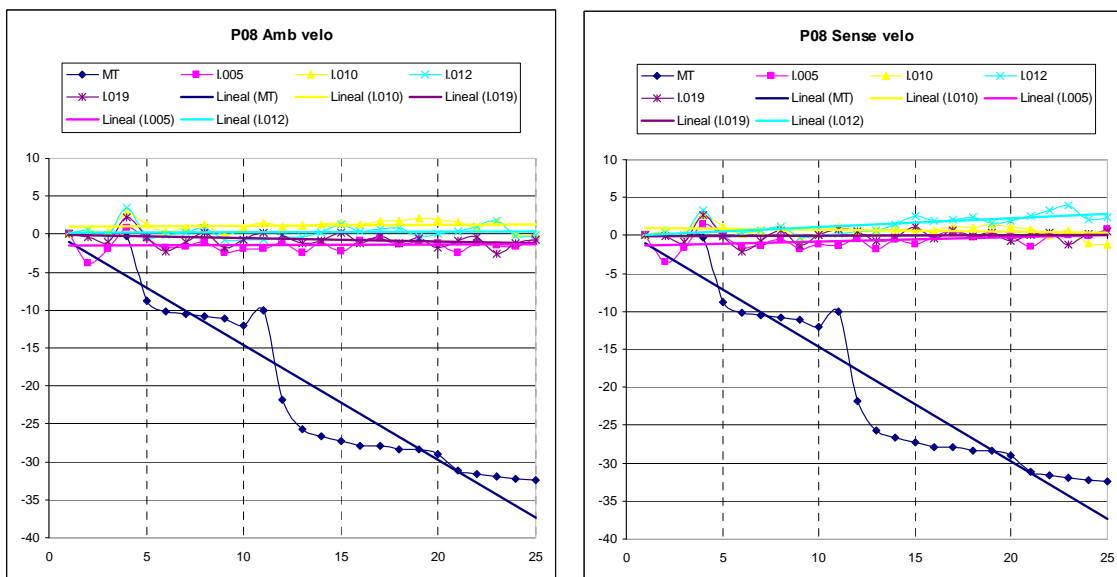


Fig. 3.11 Gràfiques del punt P08 i els punts interferomètrics propers

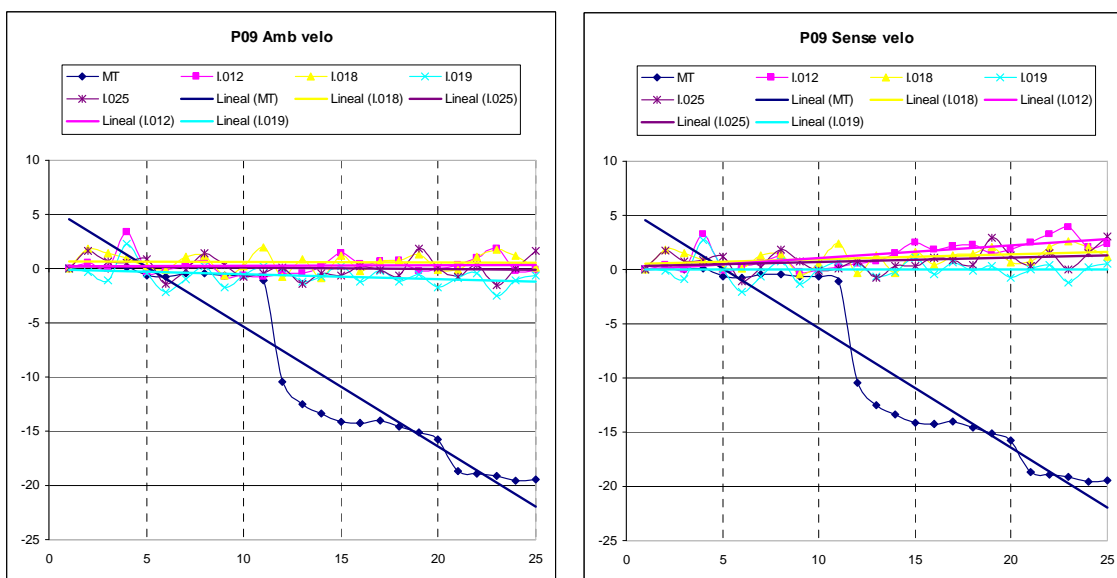


Fig. 3.12 Gràfiques del punt P09 i els punts interferomètrics propers

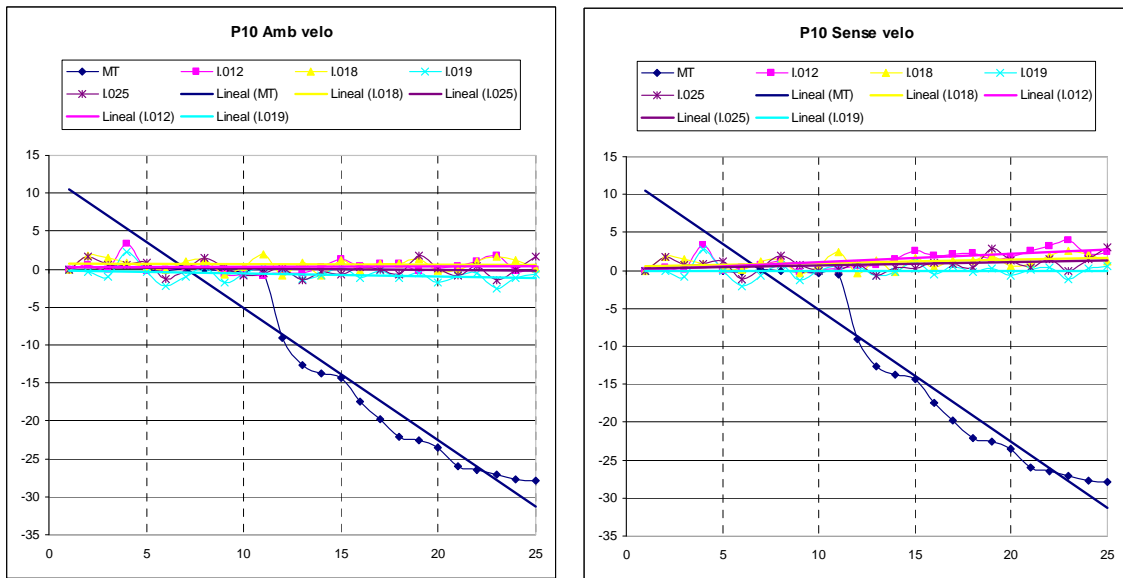


Fig. 3.13 Gràfiques del punt P10 i els punts interferomètrics propers

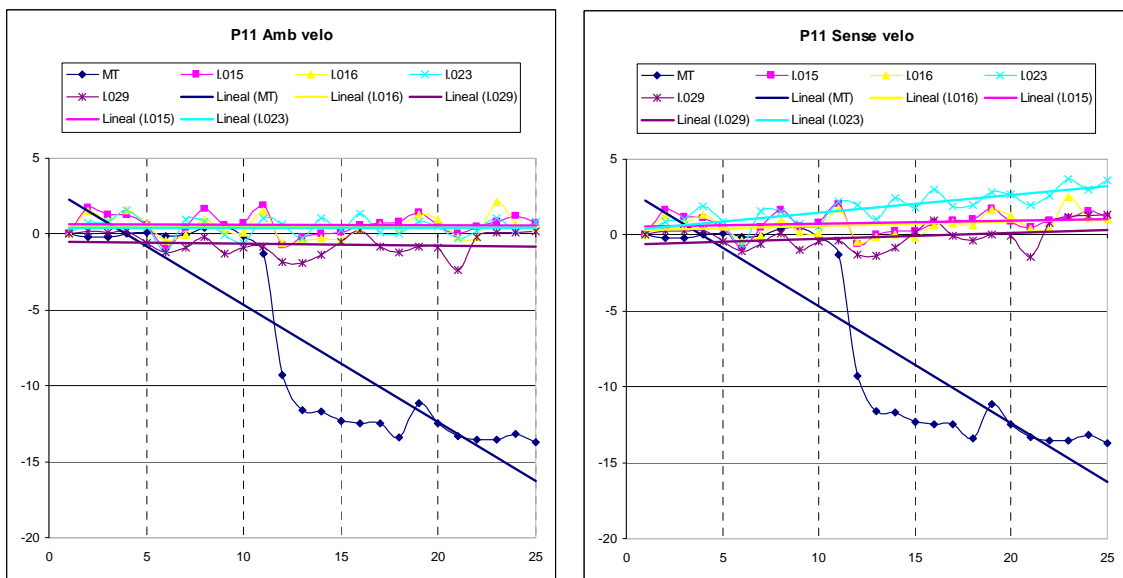


Fig. 3.14 Gràfiques del punt P11 i els punts interferomètrics propers

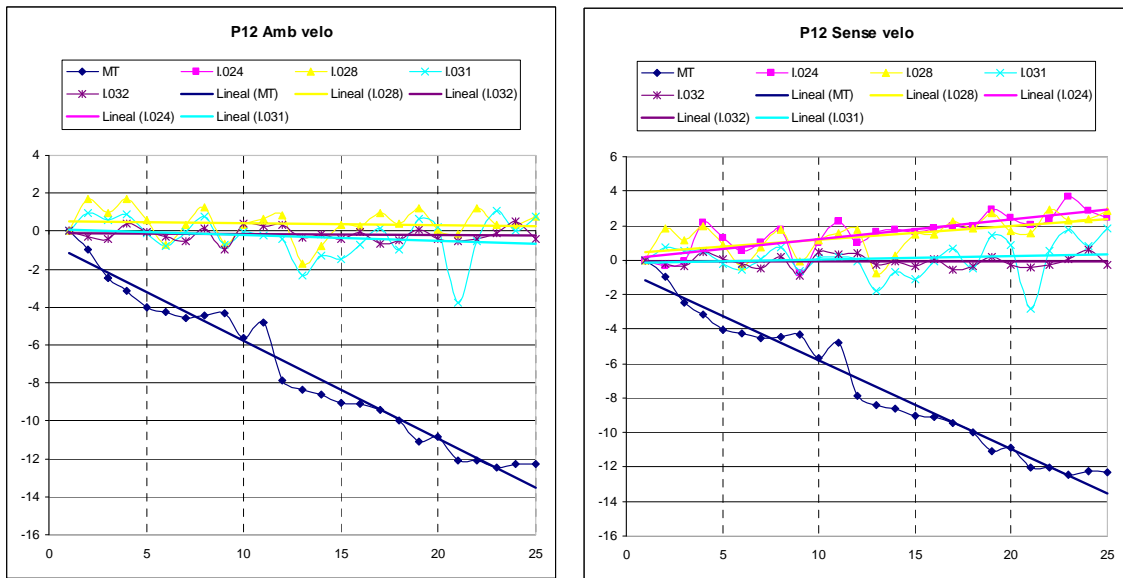


Fig. 3.15 Gràfiques del punt P12 i els punts interferomètrics propers

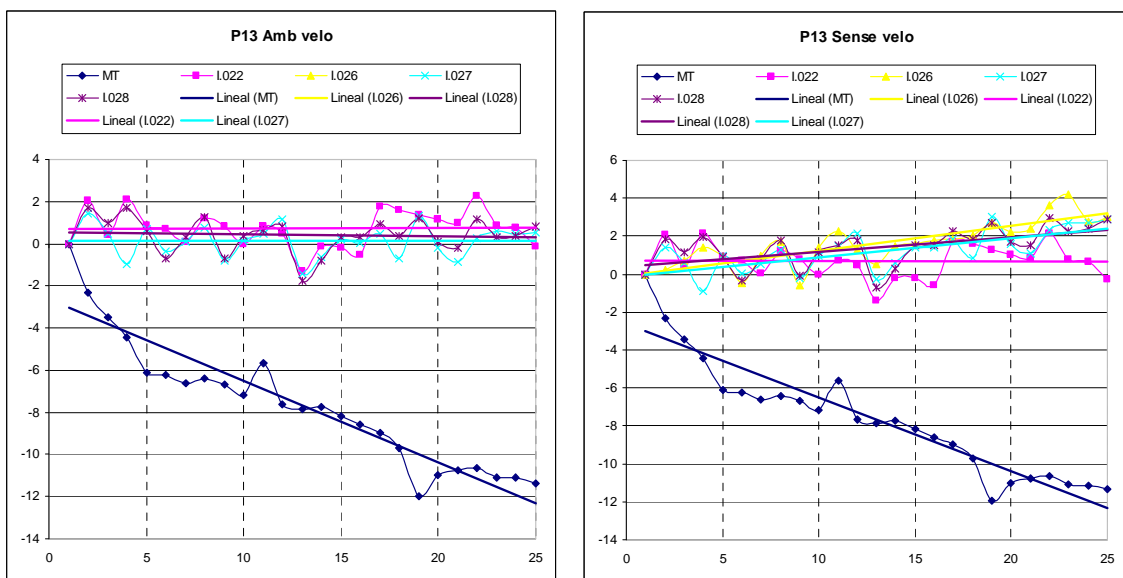


Fig. 3.16 Gràfiques del punt P13 i els punts interferomètrics propers

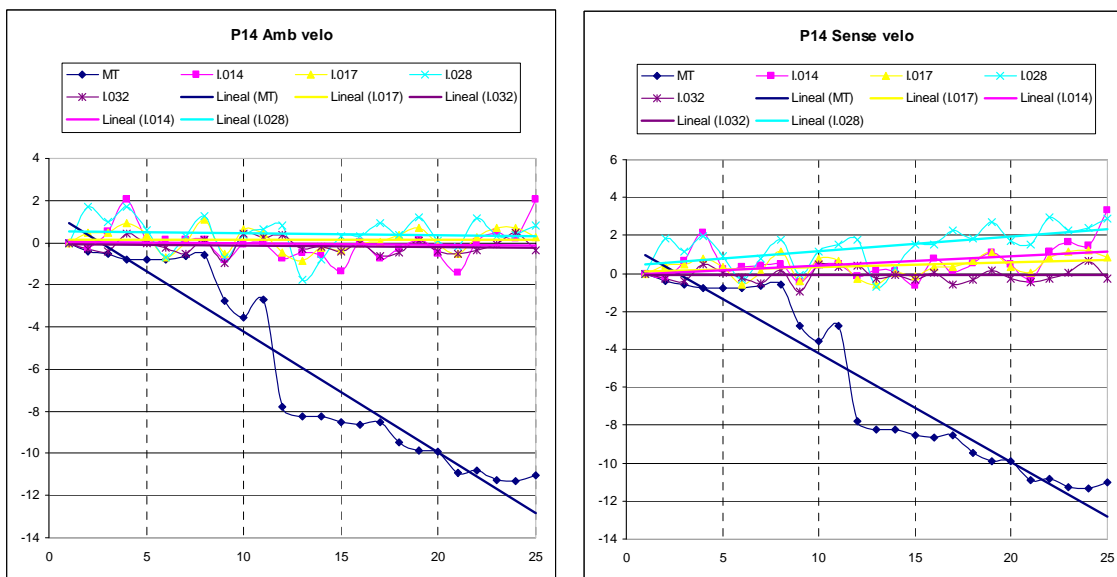


Fig. 3.17 Gràfiques del punt P14 i els punts interferomètrics propers

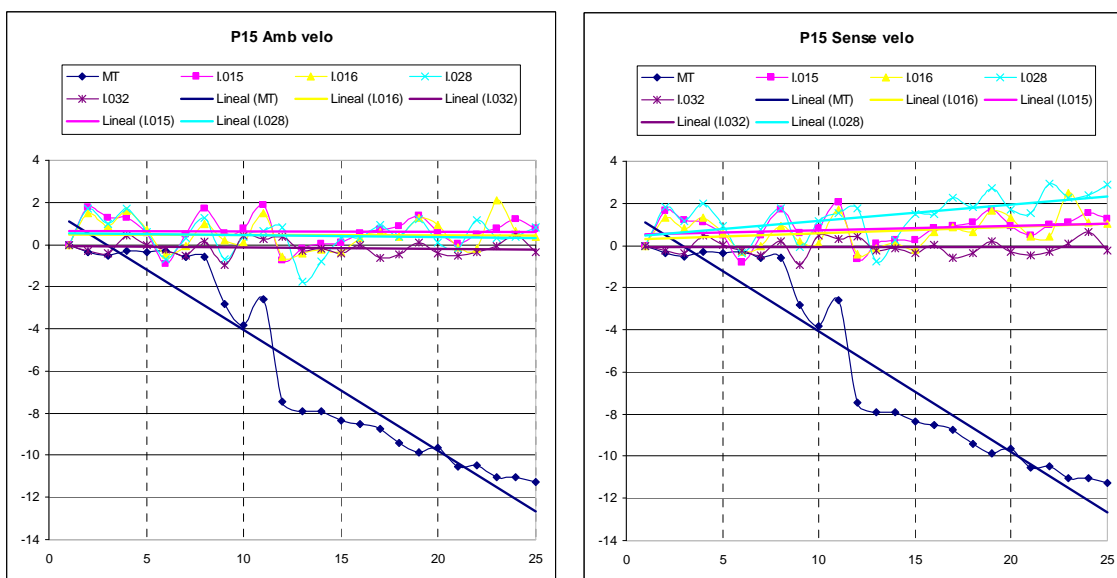


Fig. 3.18 Gràfiques del punt P15 i els punts interferomètrics propers

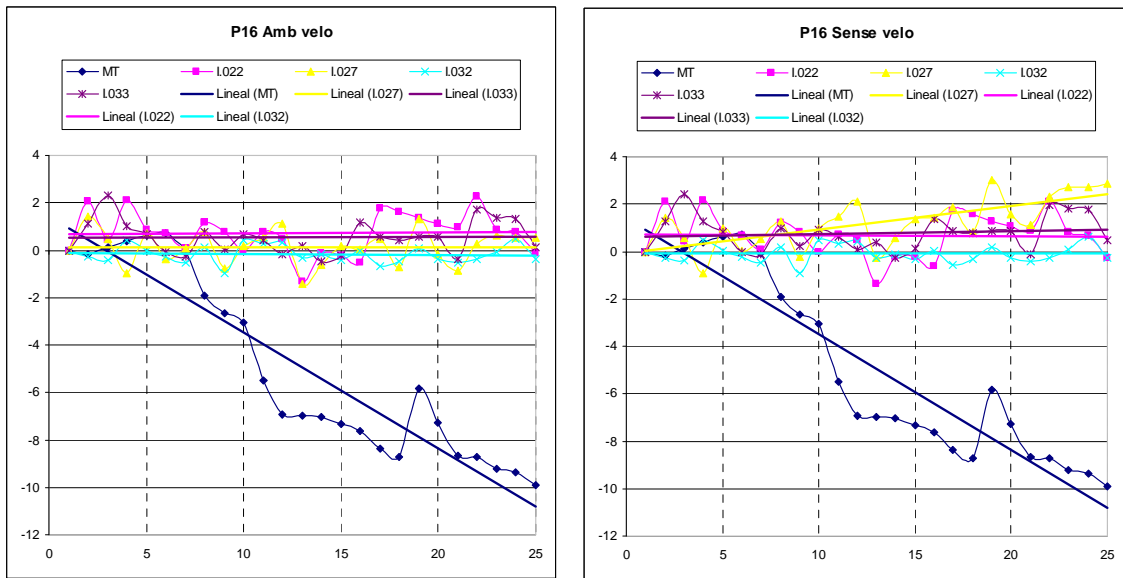


Fig. 3.19 Gràfiques del punt P16 i els punts interferomètrics propers

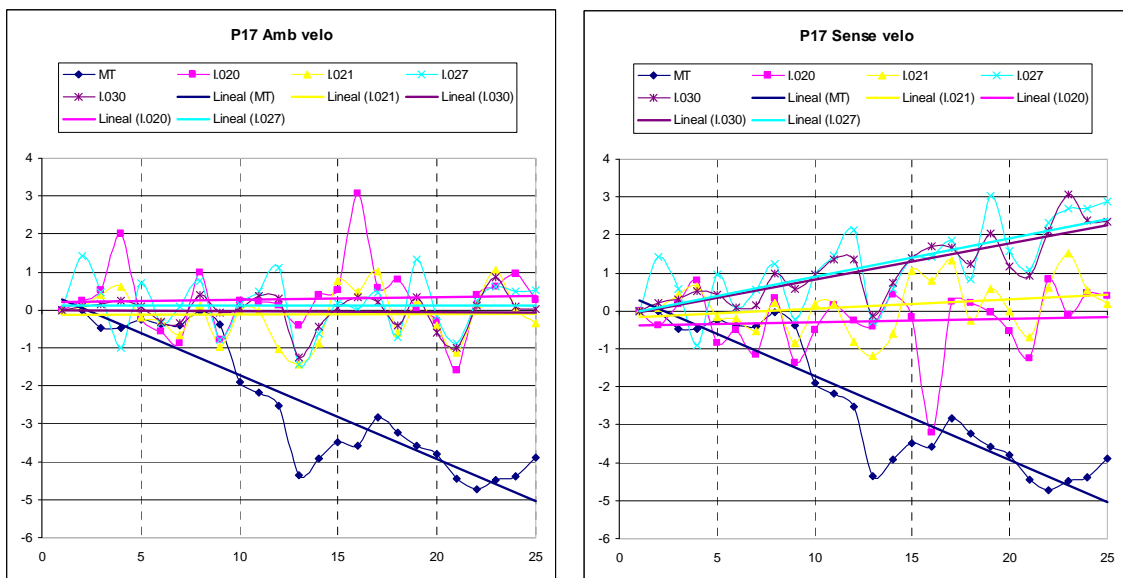


Fig. 3.20 Gràfiques del punt P17 i els punts interferomètrics propers

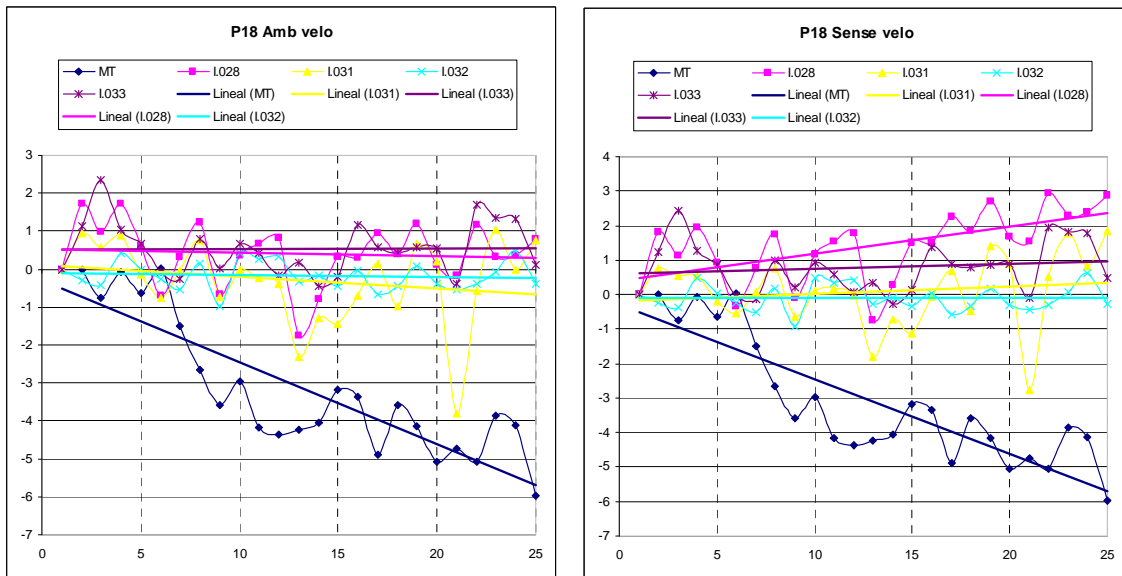



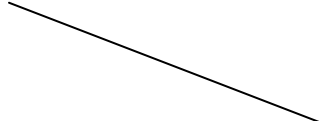
Fig. 3.21 Gràfiques del punt P18 i els punts interferomètrics propers

D'entrada es pot veure com la línia de tendència de les mesures terrestres baixa, mentre que les línies de les mesures interferomètriques o es mantenen bastant horitzontals (procés *Amb velo*) o augmenten (procés *Sense velo*). Així, a primera vista sembla que amb cap dels dos processos s'ha detectat cap subsidència, ambdós veuen la superfície plana. En canvi, amb les mesures terrestres es va mesurar una variació del sòl, i es podria dir fins i tot, que es tractava d'una variació considerable, especialment en els 18 punts analitzats.

S'ha de tenir present que perquè la tècnica PSI funcioni bé s'han de complir les següents condicions:

- Els PS (*punts permanents*) han de ser bon reflectors. En la zona on s'ha efectuat l'estudi és una zona urbana i aquestes zones, plenes d'edificis, són per definició llocs on no hi ha problemes en aquest punt.
- El model lineal (velocitat lineal i error topogràfic) s'ha de casar, apropar, a la realitat. Es a dir, la subsidència ha de seguir un moviment lineal. Així, per exemple una deformació:

1)  Funciona bé

2)  Funciona bé

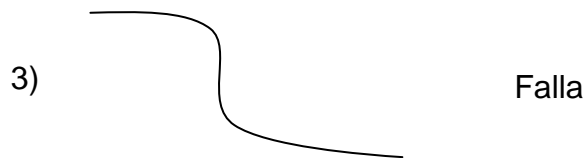


Fig. 3.22 Tipus de moviment i com funcionen amb el model aplicat

- La distància del punt interferomètric al lloc que es vol mesurar. Com que en aquest cas s'estudia efecte en el sòl pel pas d'una tuneladora, podríem dir que una distància amb un radi de fins a 50 m seria una distància on encara es podrien veure els efectes per moviments de terra

Així, és pot entendre perquè els punts P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09, P10, P11, P14, P15, P16, P17 i P018 fallen. Observis que tenen un salt de tipus graó en les mesures. El model lineal no casa amb la observació.

Un cas interessant és el P12 ja que aquest es comporta molt lineal. Es cert, que entre les bandes 11 i 12 hi ha un petit salt però, és l'excepció i a més a més, es tracta d'un salt de 3 mm. En principi, el procés l'hauria de detectar doncs el model lineal s'acosta a l'observació. Ara bé, es interessant mirar les distàncies dels punts interferomètrics al punt de referència que tenim com punt proper a la mesura terrestre (MT). Tenim les següents distàncies:

$$P12 \approx P12' \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I.024} \rightarrow \mathbf{0,0 \text{ m}} \\ \mathbf{I.028} \rightarrow \mathbf{56,6 \text{ m}} \\ \mathbf{I.031} \rightarrow \mathbf{142,0 \text{ m}} \\ \mathbf{I.032} \rightarrow \mathbf{200,4 \text{ m}} \end{array} \right\}$$

Fig. 3.23 Mesura terrestre P12 i distàncies als punts interferomètrics usats

Observis que 3 punts queden fora de la distància de 50 m que s'ha establert pel bon funcionament del sistema però, el punt I.024 està ubicat justament en P12', es a dir, en el mateix punt de referència (PR) per la mesura terrestre (MT).

Com precisament s'ha treballat amb punts de referència (PR) propers als punts amb les mesures terrestres (MT) i aquests PR s'han obtingut d'un projecte paral·lel que es desenvolupava en l'IG, el primer que s'ha buscat és la distància del PR al MT i s'ha trobat en l'altre projecte que la distància voltava el 6 a 7 m. Per tant, la distància estava dintre dels paràmetres.

Ara bé, és interessant que el punt I.024 no ha esta detectat en el procés *Amb velo*. Aquest procés no l'ha considerat un punt bo, amb la bondat suficient per acceptar-lo. En canvi el procés *Sense velo* si que l'ha acceptat com a punt bo. El motiu d'aquesta incertesa ve donat per uns càlculs en la integració, on uns

decimals el poden decantar en una banda o una altra. Potser és aquest el motiu de perquè no reflecteix tampoc la subsidència que el sòl ha patit. De totes maneres, a continuació es farà un petit anàlisi dels residus dels interferogrames a veure si ens pot ajudar a treure l'entrellat.

3.4 Anàlisi dels residus dels interferogrames

3.4.1 Gamma envers desviació estàndard dels residus

Com hem vist, el model usat pel càlcul del procés interferomètric es basa en una equació funció de l'error topogràfic i la velocitat de moviment. Amb el model es pretén apropar-se el màxim possible a les observacions, que són els interferogrames. Ara bé, aquest model no és exacte amb la realitat, existeix una diferència entre la realitat de les observacions (interferogrames) i el model usat. Aquesta diferència són els valors residuals dels interferogrames. A continuació es treballarà amb aquests valors residuals.

De tota la imatge en amplitud (Fig. 3.2) s'ha seleccionat una part que inclogui la zona d'estudi i que conté 4433 punts o píxels. Cada punt té associat un valor gamma (coherència) així com un valor residual per a cada un dels 169 interferogrames. Es calcula la desviació estàndard dels residus per cada punt. Si ara es compara a nivell global la gamma amb aquesta desviació estàndard:

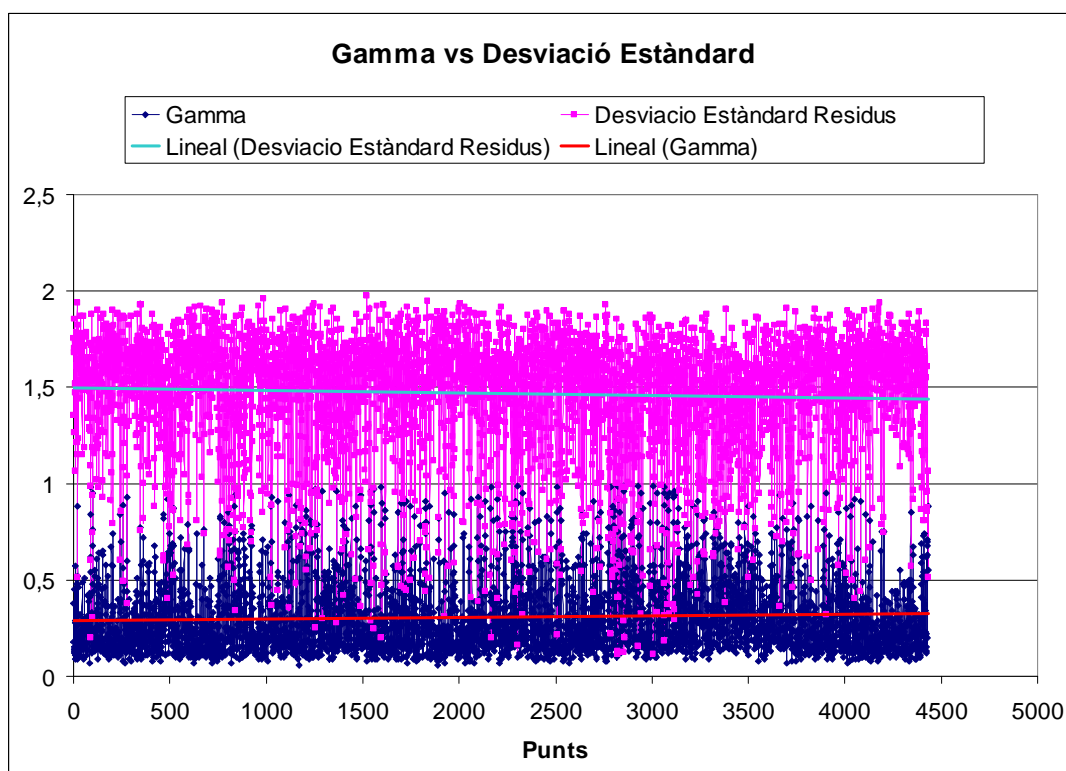


Fig. 3.24 Coherència (gamma) envers desviació estàndard dels residus dels interferogrames

D'aquesta gràfica es pot observar que:

- 1) La línia de tendència o regressió lineal de la coherència (gamma) té un valor petit pel voltant de 0,25. El que indica una coherència, en general, petita. Observis que hi ha uns punts propers a 1 que seria el cas ideal però, observis també que la major part de zona blava està per sota del valor 0,5. Així que, la gamma és petita.
- 2) La línia de tendència o regressió lineal de la desviació estàndard dels residus té un valor bastant gran, pel voltant de 1,5. Recordem que els residus dels interferogrames són precisament la diferència entre el interferograma (l'observació) i el model usat. Quan més petits siguin aquests residus millor, es a dir, si no hi ha residus (residus = 0) seria l'ideal ja que així el model casa o s'ajusta a l'observació. Així que, la desviació estàndard dels residus és relativament gran.

Si ara es divideix la gamma amb classes podrem comparar els valors de la gamma de cada classe amb la desviació estàndard dels residus de la mateixa classe. Fent aquesta divisió s'obté:

Taula 3.5 Classes de gamma envers desviació estàndard residual

		Gamma		Desv. Estànd.
	Classe	Núm. Punts	Promig	Promig [rad]
1	0.00 - 0.10	208	0,09	1,81
2	0.11 - 0.20	1523	0,16	1,69
3	0.21 - 0.30	1058	0,25	1,55
4	0.31 - 0.40	604	0,35	1,41
5	0.41 - 0.50	364	0,45	1,27
6	0.51 - 0.60	253	0,55	1,11
7	0.61 - 0.70	164	0,65	0,94
8	0.71 - 0.80	112	0,75	0,78
9	0.81 - 0.90	92	0,85	0,58
10	0.91 - 1.00	54	0,95	0,32

Observis que, en el cas de la gamma, la major part dels 4433 punts, de fet 2789 punts, es a dir, un 63% els punts estan entre les classes 1 a 3 on tenim un valor promig màxim de 0,25.

També es pot observar, que en el cas de la desviació estàndard residual, la mateixa quantitat de punts entre les mateixes classes 1 a 3, tenen un valor promig mínim de 1,55.

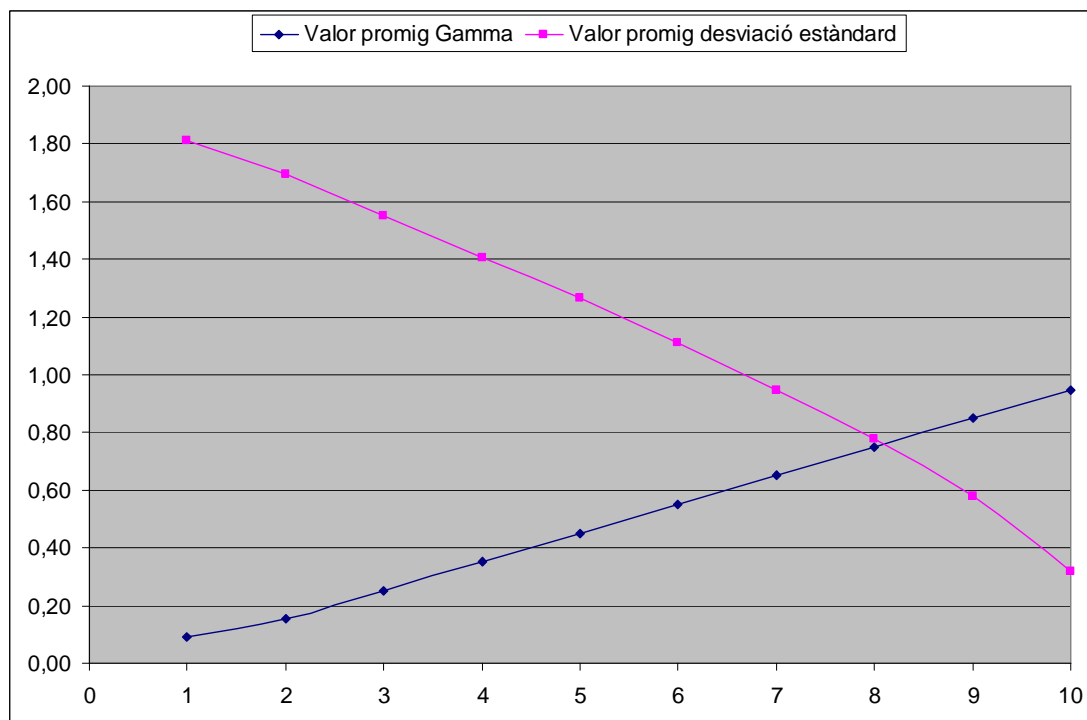


Fig. 3.25 Gràfica de la gamma envers la desviació estàndard residus agrupat per classes de gamma

Tal com s'acaba d'explicar l'ideal és una gamma (coherència) de valor 1, que és el valor màxim, i una desviació estàndard dels residus petita, tendint a zero.

En la gràfica de la Fig. 3.24 es pot observar que els dos valors no es troben fins les gammes de classe 8 i es a partir de llavors quan el valors de gamma són més grans que els valors dels residus. Seria a partir d'aquest punt quan es podria dir que els resultats tendeixen a ser considerablement bons.

3.4.2 Deformació del terreny envers dels residus

El que es farà ara es observar la variació del terreny i es compararà amb les mesures dels interferogrames seguint una línia temporal. Analitzarem dos punts dels 18 de les mesures terrestres (MT) a mode d'exemple.

Un serà el punt **P01**, del que tenim la següent gràfica de deformació del terreny de les MT.

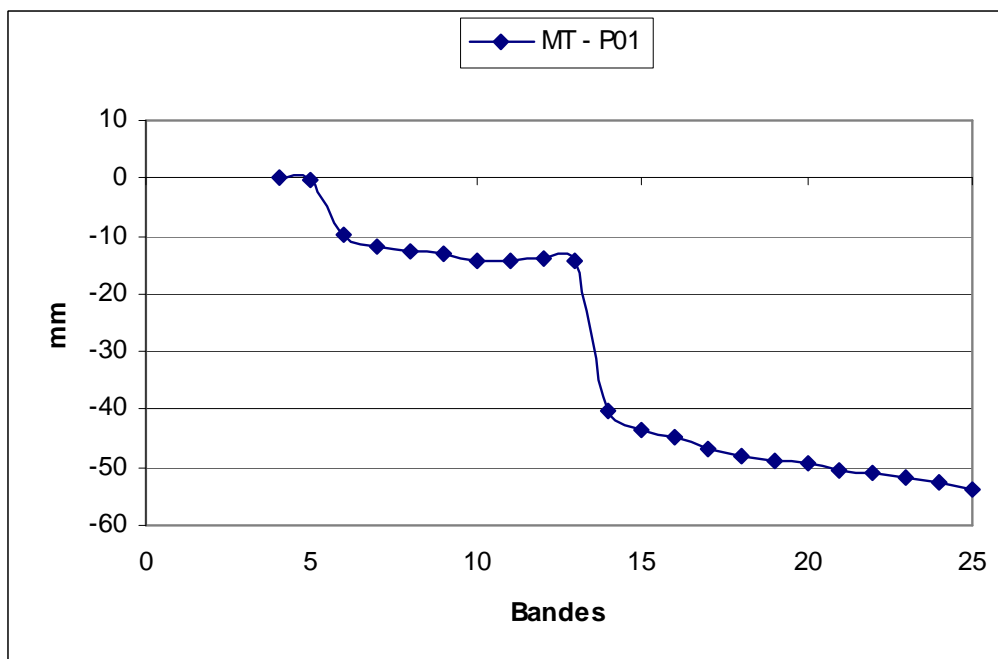


Fig. 3.26 Deformació del terreny del P01 de les MT

El que farem ara és desglossar els residus dels interferogrames seguint una línia temporal i per diferents marques.

En la següent gràfica podrem observar la variació dels residus en el temps, o en les bandes de la deformació. Recordem que cada banda està relacionada amb una data (Taula 3.2).

La gràfica té dues escales. La de l'esquerra en mil·límetres (mm) per les deformacions segons les MT. La de la dreta en radians (rad) per les variacions dels interferogrames.

Recordem també que en el cas del punt **P01** tenia relacionat quatre punts interferomètrics propers que ens han donat unes mesures. Aquests són:

$$P01 \approx P01' \left\{ \begin{array}{l} I.002 \rightarrow 100,0 \text{ m} \\ I.003 \rightarrow 102,0 \text{ m} \\ I.007 \rightarrow 21,5 \text{ m} \\ I.009 \rightarrow 23,3 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Fig. 3.27 Mesura terrestre P01 i distàncies als punts interferomètrics usats

D'aquests quatre punts, dos ja poden ser descartats per la distància, són els punts **I.002** i **I.003** ja que estan a més de 50 m. Dels altres dos punts, **I.007** i **I.009**, usarem el primer, que és el més proper per fer la comparació.

Quan es compara les MT de **P01** envers del punt interferomètric **I.007**.

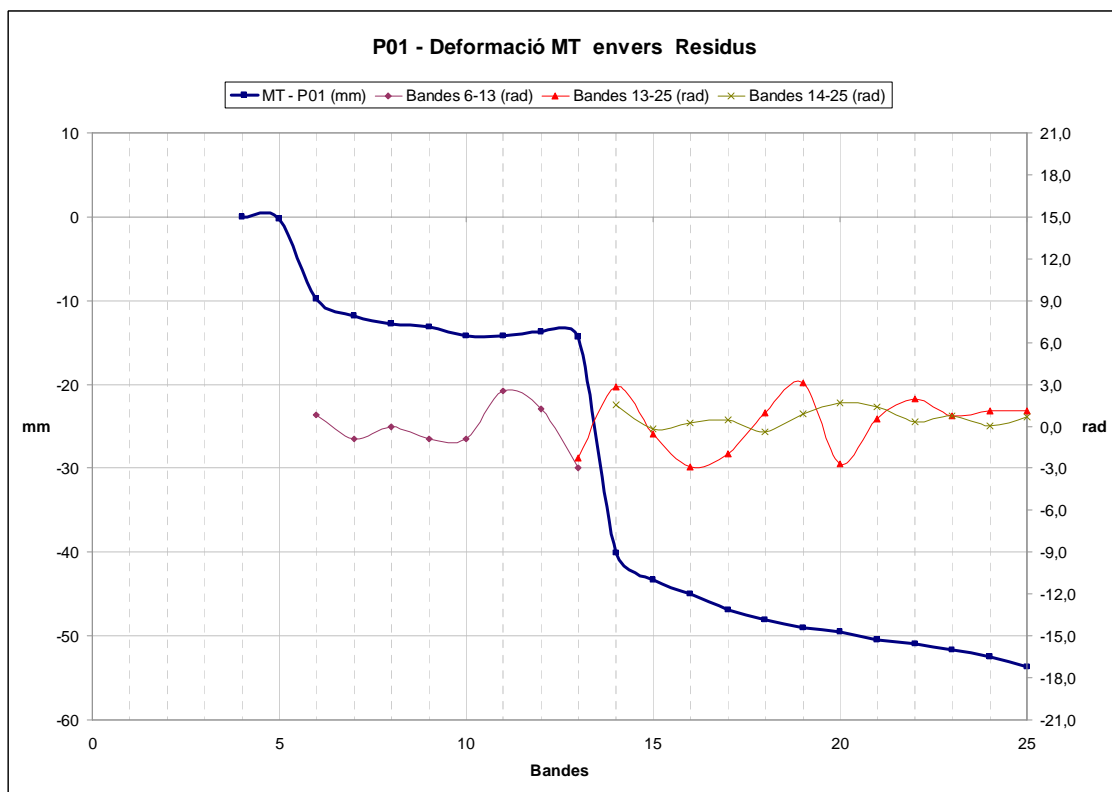


Fig. 3.27 MT P01 i residus interferogrames per trams del punt I.007

En aquest cas s'ha dividit en 3 trams:

- Tram 1: Bandes 06 – 13 que comprenen les dates 10.09.2004 – 22.07.2005
- Tram 2: Bandes 13 – 25 que comprenen les dates 22.07.2005 – 29.12.2006
- Tram 3: Bandes 14 – 25 que comprenen les dates 26.08.2005 – 29.12.2006

En el tram 1 observem un comportament bastant horitzontal lineal. Certament, fa una petita corba però, s'aproxima amb molta facilitat a un comportament lineal horitzontal. Segons el model usat en el procés interferomètric és un tipus de variació que s'hauria de detectar. A partir dels residus dels interferogrames usats, segons la següent taula, calcularem la desviació estàndard dels mateixos.

Taula 3.6 Tram 1: Interferogrames usats i valor dels residus (punt I.007)

Tram 1			
Interferograma	Imatge Master	Imatge Slave	Residus
Interf_61	6	7	0,831
Interf_70	7	8	-0,919
Interf_83	8	9	-0,048
Interf_84	8	10	-0,927
Interf_93	9	10	-0,879
Interf_103	10	12	2,571
Interf_110	11	12	1,252
Interf_120	12	13	-2,951

La desviació estàndard d'aquest és de 1,687.

Es tracta d'un valor força alt per una zona que en principi no és massa conflictiva però, es pot observar que hi ha una desviació bastant important a mesura que ens acostem a la banda 13 que és quan es produeix el salt. De fet des de les bandes 10 a la 13, quan en la gràfica es pot visualitzar una tendència a pujar. El model detectava una variació en la fase però, no acabava d'ajustar-se a les observacions.

En el tram 2 observem la caiguda abrupta de la banda 13 a la 14 (dates 22.07.2005 i 26.08.2008 respectivament) i com després segueix una pendent suau, un pendent molt lineal amb una petita inclinació. Farem el d'abans, calcularem la desviació estàndard dels residus dels interferogrames usats en aquest cas.

Taula 3.7 Tram 2: Interferogrames usats i valor dels residus (punt I.007)

Tram 2			
Interferograma	Imatge Master	Imatge Slave	Residus
Interf_112	11	14	-2,238
Interf_121	12	14	2,818
Interf_130	13	14	-0,514
Interf_122	12	15	-2,930
Interf_123	12	16	-1,952
Interf_131	13	16	0,974
Interf_124	12	17	3,140
Interf_125	12	18	-2,695
Interf_132	13	19	0,572
Interf_133	13	20	1,940
Interf_134	13	21	0,761
Interf_135	13	22	1,087
Interf_136	13	25	1,100

La desviació estàndard d'aquest és de 2,050.

En aquest cas el valor és encara major però, no es d'estranyar doncs entre aquestes bandes és quan es pot observar la deformació més abrupta, tipus graó, del terreny. És en aquestes bandes quan els valors dels residus s'allunyen més del model. De fet, és quan el model usat no detecta bé els canvis abruptes de la fase. Observem que entre les bandes 13 i 14 és quan es produeix el salt, i en canvi, té el valor residual més petit, es a dir, en teoria, és quan més s'hauria d'aproximar a les observacions però, com hem vist en el punt abans no ho fa. El que passa és que el canvi és tan brusc que ni el nota, ni tan sols el veu.

En el tram 3 observem una baixa "suau", es a dir, una pendent amb una inclinació petita. Ara farem com abans, calcular la desviació estàndard dels residus dels interferogrames usats en aquest tercer tram.

Taula 3.7 Tram 3: Interferogrames usats i valor dels residus (punt I.007)

Tram 3			
Interferograma	Imatge Master	Imatge Slave	Residus
Interf_137	14	16	1,514
Interf_143	15	17	-0,213
Interf_144	15	18	0,235
Interf_153	17	18	0,448
Interf_148	16	19	-0,427
Interf_149	16	20	0,916
Interf_158	18	20	1,708
Interf_161	19	20	1,367
Interf_166	21	22	0,326
Interf_164	20	24	0,770
Interf_168	22	25	0,037
Interf_169	23	24	0,695

La desviació estàndard d'aquest és de 0,678.

El comportament de la deformació del terreny és bastant adient pel model per tant, aquest sembla que és el lloc on menys es desvia de les observacions. Aquest tram és el que el nostre model pot detectar millor.

Amb l'estudi d'aquests tres trams es confirma que el model usat no és l'adient per deformacions abruptes, es a dir, no és adient per deformacions tipus graó. Només és útil per a deformacions lineals "suaus" amb una pendent lineal.

Com s'ha dit al principi d'aquest apartat, es farà la comparació de dos dels 18 punts de les MT. El segon serà el punt **P12** de les MT del que hem vist que la seva deformació del terreny semblava seguir una tendència que el model que s'ha usat en el procés podria seguir, es a dir, que podria detectar. Recordem que dels quatre punts interferomètrics estudiats, tres quedaven descartats per distància i un era el que generava certs dubtes, el punt **I.024**, ja que, malgrat estar en la mateixa ubicació que el punt de referència **P12'** no seguia la deformació del terreny que les MT indicaven. Veiem si ara amb aquesta comparació, podem treure millor de l'entrellat del que passa.

Tenim la següent gràfica de deformació del terreny de les MT pel punt **P12**.

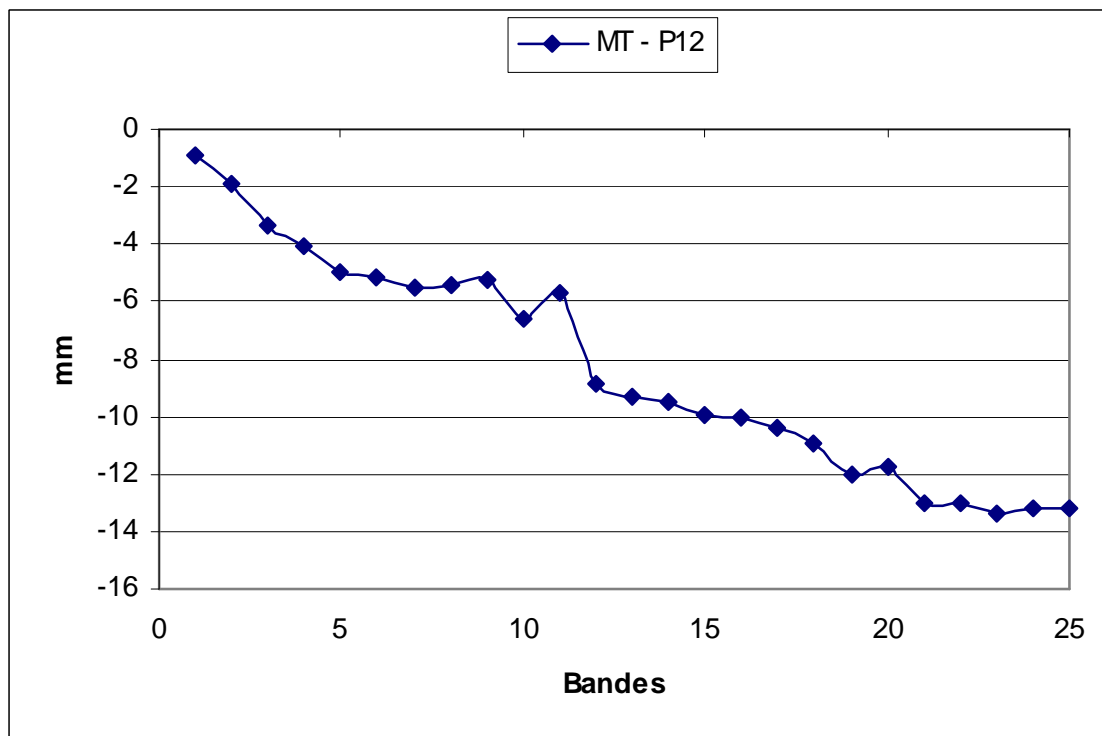


Fig. 3.28 Deformació del terreny del P01 de les MT

Quan es compara les MT de **P01** envers del punt interferomètric **I.007**.

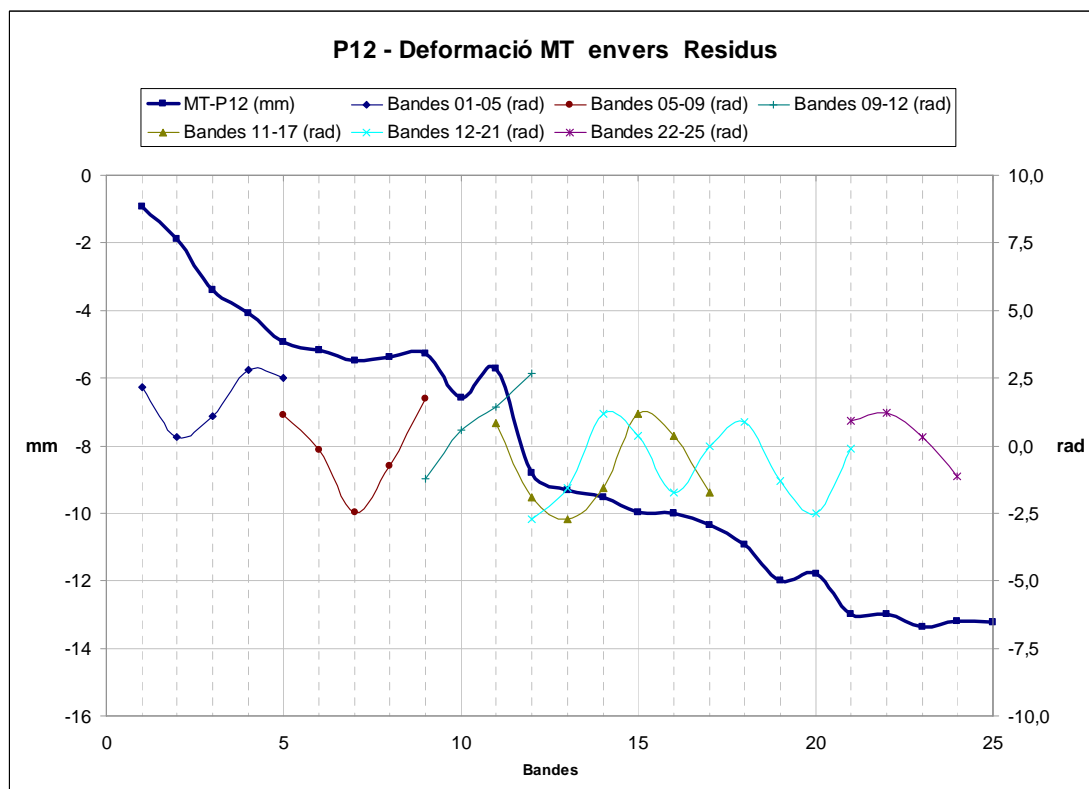


Fig. 3.29 MT P12 i residus interferogrames per trams del punt I.024

En aquest cas s'ha dividit en 6 trams:

- Tram 1: Bandes 01 – 05 que comprenen les dates 19.03.2004 – 08.06.2004
- Tram 2: Bandes 05 – 09 que comprenen les dates 08.06.2004 – 24.12.2004
- Tram 3: Bandes 09 – 12 que comprenen les dates 24.12.2004 – 17.06.2005
- Tram 4: Bandes 11 – 17 que comprenen les dates 13.05.2005 – 09.12.2005
- Tram 2: Bandes 12 – 21 que comprenen les dates 24.12.2004 – 07.07.2006
- Tram 3: Bandes 22 – 25 que comprenen les dates 11.08.2005 – 29.12.2006

En aquest cas els interferogrames usats en cada tram i els valors residuals d'aquests interferogrames es presenten en la taula següent.

Taula 3.8 Interferogrames usats i valor dels residus per trams (punt I.024)

Tram 1			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_1	1	3	2,164
Interf_11	2	3	0,304
Interf_12	2	4	1,094
Interf_13	2	5	2,814
Interf_27	3	5	2,485
Tram 2			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_48	5	7	1,123
Interf_61	6	7	-0,145
Interf_70	7	8	-2,477
Interf_71	7	9	-0,733
Interf_83	8	9	1,720
Tram 3			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_93	9	10	-1,227
Interf_94	9	11	0,563
Interf_95	9	12	1,435
Interf_103	10	12	2,662
Tram 4			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_110	11	12	0,823
Interf_111	11	13	-1,887
Interf_120	12	13	-2,734
Interf_121	12	14	-1,544
Interf_130	13	14	1,190
Interf_137	14	16	0,349
Interf_143	15	17	-1,741

Tram 5			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_120	12	13	-2,734
Interf_121	12	14	-1,544
Interf_130	13	14	1,190
Interf_137	14	16	0,349
Interf_143	15	17	-1,741
Interf_148	16	19	-0,015
Interf_153	17	18	0,870
Interf_158	18	20	-1,287
Interf_161	19	20	-2,494
Interf_162	19	21	-0,127
Tram 6			
Interferograma	Imatge master	Imatge slave	Residus
Interf_166	21	22	0,923
Interf_167	21	25	1,204
Interf_168	22	25	0,305
Interf_169	23	24	-1,140

La desviació estàndard en cada tram és:

- Tram 1: 1,044
- Tram 2: 1,648
- Tram 3: 1,635
- Tram 4: 1,543
- Tram 5: 1,341
- Tram 6: 1,045

És interessant que en aquest cas, el tram 1 té una pendent “suau” i el valor de la desviació estàndard dels residus és més proper al model entre aquests sis trams.

Per altra banda, el tram 2 que té tendència a pujar i el tram 3 que té un moviment de ziga-zaga i un canvi una mica agresta, d'uns 3 mm, són els valors de la desviació estàndard més allunyats al model.

El tram 4 i el tram 5, en principi, segueixen una tendència que pot ser detectada pel nostre model, ja que es tracta d'una pendent bastant lineal, Ara, hi ha que reconèixer que hi un canvi amb tendència a pujar i després un subsidència però, es tracta de canvis molt petis. Tot i això, els ha assignat un valor elevat per la desviació estàndard en cada cas.

En el cas del tram 6 s'observa un moviment horitzontal en el transcurs temporal, i també el valor de la desviació estàndard indica que és un dels que menys s'allunya del model entre els sis trams analitzats.

Ara bé, una dada que cal dir d'aquest punt és la seva gamma (coherència) que és de 0,19. Aquest és un valor molt baix i per tant, els resultats obtinguts poden ser perfectament qüestionats.

En aquest cas no es tracta de que el model no sigui bo. El problema està en el càlcul del punt, malgrat haver estat seleccionat pel procés com a punt amb certa bondat, el mateix procés reconeix que la seva selecció pot ser qüestionada i per això, li assigna una gamma molt baixa.

S'ha de tenir present que malgrat tenir un model adequat pel que es vulgui calcular, no tots els punts que es seleccionin tindran la mateixa bondat, i serà aquest paràmetre de la coherència, la gamma, la que ens pot ajudar a definir el tipus de seu tipus de bondat i a decidir si acceptar el resultat que facilita.

CONCLUSIONS

Primerament, ens hem introduït en el món de la interferometria d'una manera teòrica. Després d'explicar un conceptes bàsics hem anat veient les diverses tècniques interferomètriques. Hem començat pel sistema clàssic, la tècnica InSAR i hem vist com a partir de dues imatges captades per un satèl·lit i després d'haver-les correlacionant correctament, mitjançant les variacions de fase es pot obtenir la variació que ha pogut sofrir el terreny. Després hem parlat del següent pas, la tècnica DInSAR, on al funcionament d'abans, s'ha afegit un DEM per extreure la topografia del terreny. Finalment, hem passat a un dels avenços, la tècnica PSI que manté el mateix funcionament però, en aquest cas usem un punts permanents com a punts de referència per assegurar les possibles deformacions del terreny.

També s'ha donat una descripció general del complex procés interferomètric. D'aquest ens hem centrat en quatre punts: l'obtenció d'imatges i generació d'interferogrames, el model usat basat en una funció de l'estimació de l'error topogràfic i la velocitat lineal, una breu explicació del què és el desenrotllament de la fase i l'obtenció de resultats que ens ha introduït en l'anàlisi de l'estudi comparatiu.

Com es deia, s'ha fet un estudi comparatiu de les mesures terrestres en una zona de Barcelona durant el pas d'una tuneladora amb les mesures del terreny de la zona mitjançant tècniques interferomètriques. S'han usat dos processos interferomètrics on en un d'ells es feia una petita variació en el model (no es tenia en compte la contribució de la velocitat lineal). S'ha vist que aquesta variació no ens aportava cap millora. A més a més, també s'ha comprovat que mentre les mesures terrestres indicaven deformacions en el terreny de certa consideració, mitjançant el procés interferomètric aquestes no es veien, no es detectaven.

Aquí, arribem a la pregunta que fèiem en la introducció: podria ser pràctic controlar les subsidències que el sòl pot patir, durant certs moviments crítics del terreny (en aquest cas el pas d'una tuneladora i les seves subseqüents obres), mitjançant l'anàlisi de les imatges captades des d'un satèl·lit?

Doncs, vist el que s'ha vist en aquest projecte la primera resposta que es podria donar és que "no". De fet, mitjançant el procés interferomètric que hem usat no s'han pogut detectar cap de les deformacions que per altra banda les mesures terrestres indicaven. Ara bé, recordem que hem vist la limitació del nostre model. Aquest és útil per un control de les deformacions del terreny durant un espai de temps llarg i on els canvis segueixen una tendència lineal "suau" sense moviments abruptes. Però, aquest model no ens seria útil per controlar les deformacions que en una obra com el pas d'una tuneladora es poden generar.

Significa això que no es pot fer el control d'aquestes deformacions mitjançant l'anàlisi de les imatges captades des d'un satèl·lit? Doncs, no. Possiblement es

puguin controlar. El que es precis és canviar el model. Es podrien fer tot uns quants processos interferomètrics sense model i analitzar els resultats. Llavors, mitjançant uns càlculs estadístics dels resultats, es podria anar configurant un nou model per controlar aquests casos. No és gens trivial. És més, és força complex. Però, podria ser una manera de fer aquest tipus de control mitjançant tècniques interferomètriques.

Ara bé, parlem de controlar les variacions del terreny per una obra d'una envergadura considerable. Poden haver-hi edificis amb vivendes implicats. Per tant, malgrat les despeses que el control de les deformacions del terreny amb aparells de mesures terrestres puguin ser elevades, aquestes despeses no són equiparables ni al cost del pas d'una tuneladora ni a les possibles conseqüències que un error en els mateixos controls podria provocar. Aquests aparells de mesura terrestre donen una precisió molt alta, i per tant, unes millors garanties en els controls que, en aquests moments, les tècniques interferomètriques no poden donar. Per tant, en aquests casos tant crítics, l'ideal seria combinar ambdós sistemes, es a dir, aparells terrestres i tècniques interferomètriques.

En els últims anys s'han millorat molt les tècniques interferomètriques però, encara han de continuar avançant. Avançar en aquest camp vol implica temps i diners, però, els resultats poden merèixer la inversió.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C. i Rocca, F. (Dipartimento di Electronica ed Informazione, Politecnico de Milano, Italia), i Massonet, D. (CNES, Toulouse, France), “Interferometric SAR image processing and interpretation”, Part A, de *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February, 2007)*, pp. A-3 – A-40, Fletcher, K., ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands (2007)
- [2] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C. i Rocca, F. (Dipartimento di Electronica ed Informazione, Politecnico de Milano, Italia), i Massonet, D. (CNES, Toulouse, France), “InSAR processing: a practical approach”, Part B, de *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February, 2007)*, pp. B-3 – B-71, Fletcher, K., ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands (2007)
- [3] Arroyo, L.; “Elaboració i anàlisi d’imatges radar des de satèl·lit: monitorització de deformacions de terreny”, Treball Final de Carrera, Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, esp. Sistemes de Telecomunicació, Universitat Politècnica de Catalunya, EPSC, Castelldefels (2006)
- [4] López-Martínez, C., i Potter, E., “Coherence estimation in synthetic aperture radar data based on speckle noise modeling”, *Applied Optics*, Vol. 46, pàgs. 544-558, No. 4 (2007)
- [5] Mora, O., Arbiol, R., i Palà, V., “Advanced DInSAR Techniques for Monitoring Terrain Displacements”, *European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*, Vol. II, pàgs. 324-326, Barcelona (2006)
- [6] Ferretti, A., A., Prati, C. i Rocca, F. (Dipartimento di Electronica ed Informazione, Politecnico de Milano, Italia), “Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatters in Differential SAR Interferometry”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, NO. 5, pàgs. 2202-2012 (2000)
- [7] Biescas, E., Crosetto, M., Agudo, M., Monserrat, O., Crippa, B., “Two Radar Interferometric Approaches to Monitor Slow and Fast Land deformation”, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 133, No. 2, pàgs. 66–71 (2007)



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANNEXES

ANNEX A: RELACIÓ IMATGES - INTERFEROGRAMES

Cada interferograma està format per dues imatges captades pel satèl·lit, una anomenada **master** i l'altra **slave**.

En aquest Annex A s'adjunta el fitxer on es relacionen les imatges captades pel satèl·lit amb les imatges interferomètriques (interferogrames) generades amb les primeres.

Aquest fitxer forma part dels programes i **scripts** que s'usen en l'Institut de Geomàtica (IG).

```
IMAGE 1 appears in 10 interferogram
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,

IMAGE 2 appears in 16 interferogram
11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26,

IMAGE 3 appears in 18 interferogram
1, 11, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42,

IMAGE 4 appears in 6 interferogram
12, 43, 44, 45, 46, 47,

IMAGE 5 appears in 15 interferogram
13, 27, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60,

IMAGE 6 appears in 11 interferogram
2, 28, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,

IMAGE 7 appears in 18 interferogram
3, 14, 29, 48, 61, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,

IMAGE 8 appears in 14 interferogram
15, 30, 49, 70, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92,

IMAGE 9 appears in 15 interferogram
16, 31, 50, 71, 83, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102,

IMAGE 10 appears in 12 interferogram
17, 43, 51, 84, 93, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109,

IMAGE 11 appears in 17 interferogram
4, 18, 32, 52, 62, 72, 94, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117,
118, 119,

IMAGE 12 appears in 18 interferogram
19, 33, 53, 73, 85, 95, 103, 110, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126,
127, 128, 129,

IMAGE 13 appears in 13 interferogram
5, 34, 63, 74, 111, 120, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136,

IMAGE 14 appears in 13 interferogram
6, 35, 64, 75, 112, 121, 130, 137, 138, 139, 140, 141, 142,
```

IMAGE 15 appears in 12 interferogram
20, 44, 54, 86, 96, 104, 122, 143, 144, 145, 146, 147,

IMAGE 16 appears in 13 interferogram
7, 36, 65, 76, 113, 123, 131, 137, 148, 149, 150, 151, 152,

IMAGE 17 appears in 15 interferogram
21, 37, 55, 77, 87, 97, 105, 114, 124, 143, 153, 154, 155, 156, 157,

IMAGE 18 appears in 12 interferogram
22, 45, 56, 88, 98, 106, 125, 144, 153, 158, 159, 160,

IMAGE 19 appears in 16 interferogram
23, 38, 57, 66, 78, 89, 99, 115, 126, 132, 138, 148, 154, 161, 162,
163,

IMAGE 20 appears in 18 interferogram
24, 39, 58, 79, 90, 100, 107, 116, 127, 133, 139, 145, 149, 155, 158,
161, 164, 165,

IMAGE 21 appears in 11 interferogram
8, 40, 67, 80, 117, 134, 140, 150, 162, 166, 167,

IMAGE 22 appears in 10 interferogram
9, 41, 68, 81, 118, 135, 141, 151, 166, 168,

IMAGE 23 appears in 6 interferogram
46, 91, 108, 146, 159, 169,

IMAGE 24 appears in 12 interferogram
25, 47, 59, 92, 101, 109, 128, 147, 156, 160, 164, 169,

IMAGE 25 appears in 17 interferogram
10, 26, 42, 60, 69, 82, 102, 119, 129, 136, 142, 152, 157, 163, 165,
167, 168,

Interf_1 --> 1 3
Interf_2 --> 1 6
Interf_3 --> 1 7
Interf_4 --> 1 11
Interf_5 --> 1 13
Interf_6 --> 1 14
Interf_7 --> 1 16
Interf_8 --> 1 21
Interf_9 --> 1 22
Interf_10 --> 1 25
Interf_11 --> 2 3
Interf_12 --> 2 4
Interf_13 --> 2 5
Interf_14 --> 2 7
Interf_15 --> 2 8
Interf_16 --> 2 9
Interf_17 --> 2 10
Interf_18 --> 2 11
Interf_19 --> 2 12
Interf_20 --> 2 15
Interf_21 --> 2 17
Interf_22 --> 2 18
Interf_23 --> 2 19
Interf_24 --> 2 20
Interf_25 --> 2 24

Interf_26	--> 2	25
Interf_27	--> 3	5
Interf_28	--> 3	6
Interf_29	--> 3	7
Interf_30	--> 3	8
Interf_31	--> 3	9
Interf_32	--> 3	11
Interf_33	--> 3	12
Interf_34	--> 3	13
Interf_35	--> 3	14
Interf_36	--> 3	16
Interf_37	--> 3	17
Interf_38	--> 3	19
Interf_39	--> 3	20
Interf_40	--> 3	21
Interf_41	--> 3	22
Interf_42	--> 3	25
Interf_43	--> 4	10
Interf_44	--> 4	15
Interf_45	--> 4	18
Interf_46	--> 4	23
Interf_47	--> 4	24
Interf_48	--> 5	7
Interf_49	--> 5	8
Interf_50	--> 5	9
Interf_51	--> 5	10
Interf_52	--> 5	11
Interf_53	--> 5	12
Interf_54	--> 5	15
Interf_55	--> 5	17
Interf_56	--> 5	18
Interf_57	--> 5	19
Interf_58	--> 5	20
Interf_59	--> 5	24
Interf_60	--> 5	25
Interf_61	--> 6	7
Interf_62	--> 6	11
Interf_63	--> 6	13
Interf_64	--> 6	14
Interf_65	--> 6	16
Interf_66	--> 6	19
Interf_67	--> 6	21
Interf_68	--> 6	22
Interf_69	--> 6	25
Interf_70	--> 7	8
Interf_71	--> 7	9
Interf_72	--> 7	11
Interf_73	--> 7	12
Interf_74	--> 7	13
Interf_75	--> 7	14
Interf_76	--> 7	16
Interf_77	--> 7	17
Interf_78	--> 7	19
Interf_79	--> 7	20
Interf_80	--> 7	21
Interf_81	--> 7	22
Interf_82	--> 7	25
Interf_83	--> 8	9
Interf_84	--> 8	10
Interf_85	--> 8	12
Interf_86	--> 8	15

Interf_87	-->	8	17
Interf_88	-->	8	18
Interf_89	-->	8	19
Interf_90	-->	8	20
Interf_91	-->	8	23
Interf_92	-->	8	24
Interf_93	-->	9	10
Interf_94	-->	9	11
Interf_95	-->	9	12
Interf_96	-->	9	15
Interf_97	-->	9	17
Interf_98	-->	9	18
Interf_99	-->	9	19
Interf_100	-->	9	20
Interf_101	-->	9	24
Interf_102	-->	9	25
Interf_103	-->	10	12
Interf_104	-->	10	15
Interf_105	-->	10	17
Interf_106	-->	10	18
Interf_107	-->	10	20
Interf_108	-->	10	23
Interf_109	-->	10	24
Interf_110	-->	11	12
Interf_111	-->	11	13
Interf_112	-->	11	14
Interf_113	-->	11	16
Interf_114	-->	11	17
Interf_115	-->	11	19
Interf_116	-->	11	20
Interf_117	-->	11	21
Interf_118	-->	11	22
Interf_119	-->	11	25
Interf_120	-->	12	13
Interf_121	-->	12	14
Interf_122	-->	12	15
Interf_123	-->	12	16
Interf_124	-->	12	17
Interf_125	-->	12	18
Interf_126	-->	12	19
Interf_127	-->	12	20
Interf_128	-->	12	24
Interf_129	-->	12	25
Interf_130	-->	13	14
Interf_131	-->	13	16
Interf_132	-->	13	19
Interf_133	-->	13	20
Interf_134	-->	13	21
Interf_135	-->	13	22
Interf_136	-->	13	25
Interf_137	-->	14	16
Interf_138	-->	14	19
Interf_139	-->	14	20
Interf_140	-->	14	21
Interf_141	-->	14	22
Interf_142	-->	14	25
Interf_143	-->	15	17
Interf_144	-->	15	18
Interf_145	-->	15	20
Interf_146	-->	15	23
Interf_147	-->	15	24

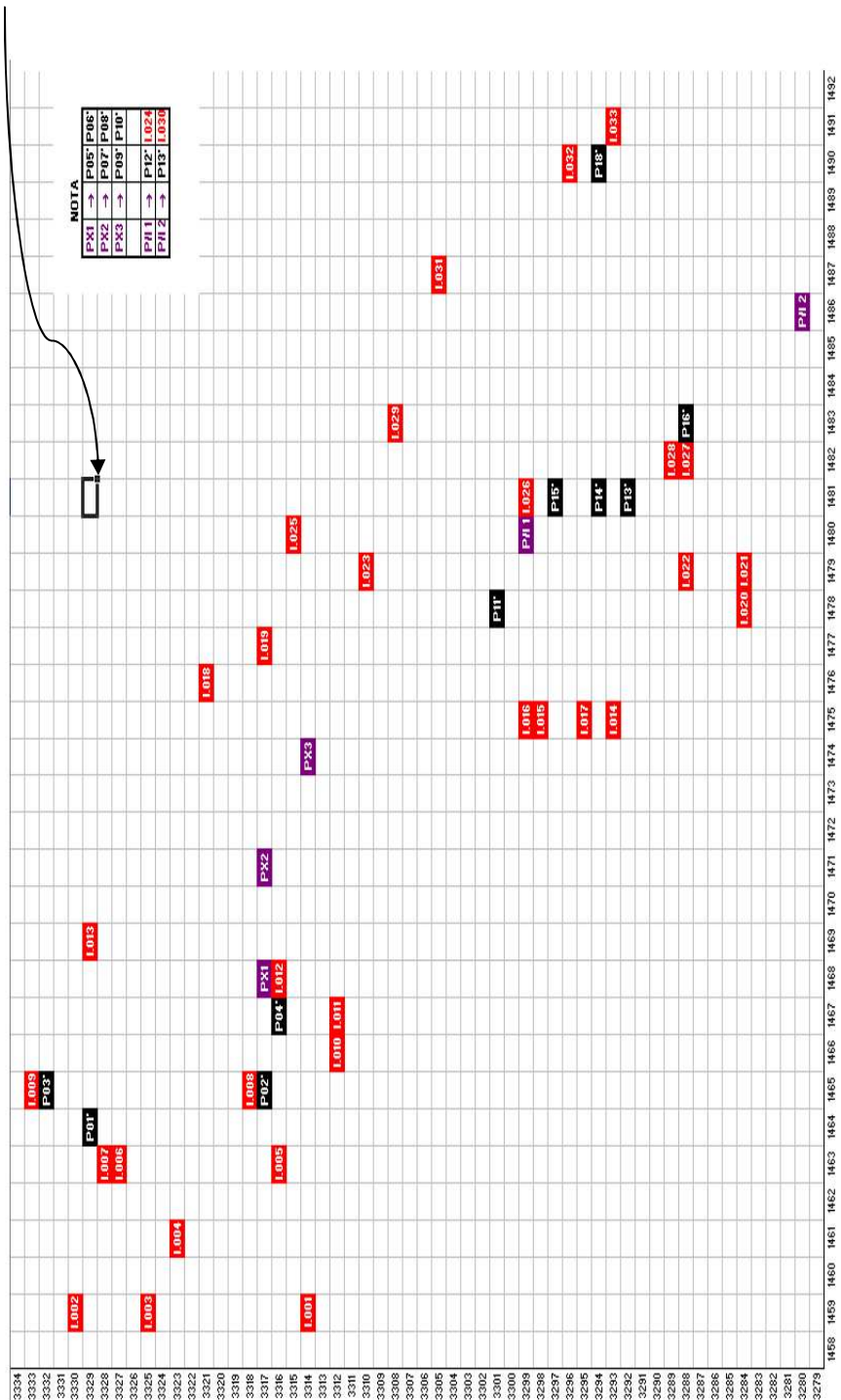
Interf_148	-->	16	19
Interf_149	-->	16	20
Interf_150	-->	16	21
Interf_151	-->	16	22
Interf_152	-->	16	25
Interf_153	-->	17	18
Interf_154	-->	17	19
Interf_155	-->	17	20
Interf_156	-->	17	24
Interf_157	-->	17	25
Interf_158	-->	18	20
Interf_159	-->	18	23
Interf_160	-->	18	24
Interf_161	-->	19	20
Interf_162	-->	19	21
Interf_163	-->	19	25
Interf_164	-->	20	24
Interf_165	-->	20	25
Interf_166	-->	21	22
Interf_167	-->	21	25
Interf_168	-->	22	25
Interf_169	-->	23	24

ANNEX B: GRÀFICA PÍXELS

A continuació es pot veure una gràfica que vol representar els píxels amb els que s'ha treballat. Cada requadre representa un píxel.

- Punts de referència (P01', P02', ... P18') en fons negre
- Punts dels processos interferomètrics (I.001, I.002, ... I.033) en fons vermell
- Els píxels en fons lila són els píxels on coincideixen més d'un punt tal i com s'explica en **NOTA**

Àrea del píxel: **20 x 4 m**



ANNEX C: PROGRAMA

En aquest annex s'adjunta el programa amb C++ que es va dissenyar per treballar amb els 454 punts de mesures terrestres (MT) que se'ns van facilitar.

El que fa el programa:

1. Llegeix els punts d'un fitxer i els relaciona amb les mesures de cadascú arxivades en un altre fitxer. Ambdós fitxers són de text (.txt)
2. Dona les dades del punt (nom, coordenades, data inici mesures, data final mesures), les variacions del sòl en mil·límetres que cada punt ha patit i el número de mesures que s'han fet
3. Donades unes coordenades busca el punts propers en un radi de 50 metres
4. Busca les variacions que ha tingut un punt entre unes dades donades
5. Els resultats es mostren per pantalla i es registren en un fitxer de text (.txt)

Finalment, aquest programa no s'ha usat. Primerament, perquè s'ha treballat amb només 18 punts de les mesures terrestres (MT), els que tenien les variacions més acusades. Segon, perquè no s'ha treballat amb coordenades geogràfiques sinó en la xarxa de píxels, amb fila i columna. Com només es tractava de 18 punts s'han buscat manualment amb el programa ENVI.

Malgrat tot, s'ha decidit incloure el programa en els annexes.

```
// Programa.cpp: Arxiu de projecte principal.

#include <fstream>           // Biblioteca per a l'ús de fitxers
#include <iostream>         // Biblioteca per a la entrada-sortida
estàndar
#include <iomanip>
#include <cstdlib>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <malloc.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <ctime>
#include <conio.h>

using namespace std;

// *****
// Es defineixen les constants
// *****
# define NumDates 4383           // Número de dies definits en
Dates.txt (01.01.2001 - 31.12.2012)
# define NumMaxMes 1403         // Número màxim de mesures
d'un punt
# define NumTotalPunts 464      // Número total de punts en
el fitxer Punt.txt
# define MaxDistPuntProper 50.0000 // Distància màxima per considerar
un punt proper a un altre (m)

// *****
// Es defineixen les estructures globals
// *****
typedef struct tipus_mpunt
{
    int data;                    // Data de cada mesura amb
format aaaammdd
    double mesura;              // Valor de cada mesura
}tipus_mpunt;

typedef struct tipus_punt
{
    char nom[18];                // Nom del
punt definit en 18 caràcters
    double coordenada_E;        //
Coordenada EST del punt
    double coordenada_N;        //
Coordenada Nord del punt
    double cota;                //
Posició cota del punt
    int data_inicial;           // Data
inicial mesures amb format aaaammdd
    int data_final;             //
Data final mesures amb format aaaammdd
    int num_mesures;            //
Número de mesures en el punt
    struct tipus_mpunt observacio[NumMaxMes]; // Observacio de
cada mesura del punt
}tipus_punt;
```



```
// *****
// Es defineixen les variables globals
// *****
char nompunt[18];
int datapunt;
double m_punt;

// *****
// Es defineixen les variables globals
// *****
struct tipus_punt punt[NumTotalPunts];
int posicio;

// *****
// Es defineixen les funcions o subrutines
// *****

// *****
// Funció que fa una pausa de 't' milisegons per tal de
// donar temps per visualitzar alguna informació
// *****
void pausa (int t)
{
    long tmi = clock() + t;
    while (clock() < tmi);
}

// *****
// Funció que comprova si un any determinat és un any de
// traspàs, per tenir en compte el dia de més a febrer
// *****
bool any_traspas (int a)
{
    return ((a % 4 == 0) && (a % 100 != 0) || (a % 400 == 0));
}

// *****
// Funció que assegura que els caracters introduïts són
// números i no pas lletres, ja que extracta d'una data
// *****
int comprovar_caracters (char a[2])
{
    int i;
    int c = 1;

    for (i=0; i<2; i++)
        if ((a[i] < 48) || (a[i] > 57))
            c = 0;

    return (c);
}

int comprovar_caracters_any (char a[4])
{

```

```
int i;
int c = 1;

for (i=0; i<4; i++)
    if ((a[i] < 48) || (a[i] > 57))
        c = 0;

return (c);
}

// *****
// Funció que permet seleccionar una data
// S'agafa dia (dd), mes (mm), i any (aaaa) com caracters
// Retorna la data en tipus integer en format aaaammdd
// *****
int seleccionar_data ()
{
    int ok;
    int dd, mm, aa;

    do
    {
        cout << "\nIntrodueix dia : ";
        cin >> dd;
        cout << "\nIntrodueix mes : ";
        cin >> mm;
        cout << "\nIntrodueix any : ";
        cin >> aa;

        ok = 0;

        if (aa >= 1990)
            ok = 1;
        else
            ok = 0;

        if ((mm == 2) && (any_traspas (aa)))
        {
            if (dd <=29)
                ok++;
            else
                ok = 0;
        }
        if ((mm == 2) && (!any_traspas (aa)))
        {
            if (dd <=28)
                ok++;
            else
                ok = 0;
        }

        if ((mm == 1) || (mm == 3) || (mm == 5) || (mm == 7) || (mm
== 8) || (mm == 10) || (mm == 12))
        {
            if (dd <= 31)
                ok++;
        }

        if ((mm == 4) || (mm == 6) || (mm == 9) || (mm == 11))
        {
```

```

        if (dd <= 30)
            ok++;
    }

    if (ok < 2)
    {
        cout << "\n\nERROR!! Aquesta data no està en el
calendari" << endl;
        cout << "RECORDA:" << endl;
        cout << " - Any igual o superior a 1990" << endl;
        cout << " - Els mesos 01, 03, 05, 07, 08, 10, 12
tenen 31 dies" << endl;
        cout << " - Els mesos 04, 06, 09, 11 tenen 30 dies"
<< endl;
        cout << " - El mes 02 te 28 dies excepte en any de
traspas que en te 29" << endl;
        cout << "Torna-ho a intentar (Esparar 10 segons)";
        pausa (10000);
        system ("cls");
    }
} while (ok < 2);

return ((aa*10000)+(mm*100)+ dd);
}

// *****
// Primer cas
// Variació de l'alçada en el pla Est - Nord
// *****
void primer_cas ()
{
    int i, j;

    ofstream fs01; // Declarem el fitxer per les dades de sortida
del fitxer "SORTIDAa_01_Variacio_Temporal_h.txt"
    fs01.open ("SORTIDA_01_Variacio_Temporal_h.txt");
    fs01.precision (10); // S'aplicarà una precisió de 10 dígit
en les variables amb valors Reals

    for (i=0; i<NumTotalPunts; i++)
    {
        // Primerament s'emmagatzement les coordenades
cartogràfiques EST i NORD
        j= punt[i].num_mesures - 1;
        fs01 << setw (18) << punt[i].nom;
        fs01 << setw (17) << punt[i].coordenada_E;
        fs01 << setw (17) << punt[i].coordenada_N;

        // Calculem la variació en l'alçada: última mesura -
primera mesura
        if (punt[i].observacio[0].mesura == 0.0)
            fs01 << setw (17) << punt[i].observacio[j].mesura <<
endl;
        else
            if (punt[i].observacio[j].mesura == 0.0)
                fs01 << setw (17) <<
punt[i].observacio[0].mesura << endl;
            else

```

```

        fs01 << setw (17) <<
punt[i].observacio[j].mesura - punt[i].observacio[0].mesura << endl;"
";
    }
    fs01.close();
}

// *****
// Segon cas
// Donades les coordenades d'un punt trobar punts propers
// *****
void segon_cas ()
{
    int i, num;
    double c_E, c_N;        // Les variables que l'usuari omplirà
quan se li sol·liciti

    cout << "Introdueix la coordenada EST :  ";
    cin >> c_E;
    cout << "Introdueix la coordenada NORD :  ";
    cin >> c_N;

    ofstream fs02;          // Declarem el fitxer per les dades
de sortida del fitxer "SORTIDA_02_Punts_Propers.txt"
    fs02.open ("SORTIDA_02_Punts_Propers.txt");
    fs02.precision (10);    // S'aplicarà una precisió de 10 dígit
en les variables amb valors Reals

    // Es guarda en el fitxer
    fs02 << "Coordenades seleccionades:  " << c_E << " E  " << c_N
<< " N " << endl;
    fs02 << "\nPunts propers\n" << endl;

    // Es visualitza per pantalla
    cout.precision (10);
    cout << "\n\nCoordenades seleccionades:  " << c_E << " E  " <<
c_N << " N " << endl;
    cout << "\nPunts propers a aquestes coordenades\n" << endl;

    num =0;
    for (i=0; i<NumTotalPunts; i++)
    {
        if (sqrt (((punt[i].coordenada_E -
c_E)*(punt[i].coordenada_E - c_E)) + ((punt[i].coordenada_N -
c_N)*(punt[i].coordenada_N - c_N))) <= MaxDistPuntProper)
        {
            // Es guarda en el fitxer
            fs02 << setw (18) << punt[i].nom;
            fs02 << setw (17) << punt[i].coordenada_E;
            fs02 << setw (17) << punt[i].coordenada_N << endl;

            // Es visualitza per pantalla
            cout << setw (18) << punt[i].nom;
            cout << setw (17) << punt[i].coordenada_E;
            cout << setw (17) << punt[i].coordenada_N << endl;

            num++;
        }
    }
    fs02 << "\nTotal de punts propers :  " << num << endl;
}

```

```

    cout << "\nTotal de punts propers : " << num << endl;

    fs02.close();
    getchar();
}

// *****
// Tercer cas
// Variació de l'alçada en el pla Est - Nord en un temps determinat
// *****
void tercer_cas ()
{
    int i, j, k;
    int ok;
    int data_imesura, data_fmesura;
    int ii, jj;
    double variacio_mesura;

    k = 0;
    while (k == 0)
    {
        cout << "Calcul de la variacio de 'h' en un determinat
temps" << endl;
        cout << "Introduir les dates que acoten la busqueda" <<
endl;

        cout << "\nDATA INICI" << endl;
        cout << "-----" << endl;
        data_imesura = seleccionar_data ();

        cout << "\nDATA INICI" << endl;
        cout << "-----" << endl;
        data_fmesura = seleccionar_data ();

        if (data_imesura >= data_fmesura)
        {
            cout << "\n\nERROR!! Aquest acotament temporal no és
correcte" << endl;
            cout << "\nLa data inicial ha de ser abans de la data
final" << endl;
            cout << "Torna-ho a intentar (Esparar 5 segons)";
            pausa (5000);
            system ("cls");
        }
        else
            k = 1;
    }

    ofstream fs03; // Declarem el fitxer per les dades
de sortida del fitxer "SORTIDA_03_Variacio_h_temps_determinat.txt"
    fs03.open ("SORTIDA_03_Variacio_h_temps_determinat.txt");
    fs03.precision (10); // S'aplicarà una precisió de 10 digits
en les variables amb valors Reals

    fs03 << "Dates seleccionades : " << setw (12) << data_imesura
<< setw (12) << data_fmesura << endl;
    for (k=0; k<90; k++)
        fs03 << "-";
    fs03 << "-" << endl;

```

```

    for (i=0; i<NumTotalPunts; i++)
    {
        ok = 0;
        j = 0;

        // Pels casos en que només tenim mesura al principi i al
final
        k = punt[i].num_mesures - 1;
        if ((punt[i].num_mesures == 2) && (data_imesura ==
punt[i].observacio[j].data) && (data_fmesura ==
punt[i].observacio[k].data))
        {
            variacio_mesura = punt[i].observacio[k].mesura
- punt[i].observacio[j].mesura;
            ok = 1;
        }

        // Pels casos en que tenim una sèrie temporal
        ii = -1;
        jj = -1;
        while ((j<punt[i].num_mesures) && (ok == 0))
        {
            if ((data_imesura == punt[i].observacio[j].data) &&
(ii == -1))
                ii = j;

            if ((data_fmesura == punt[i].observacio[j].data) &&
(jj == -1))
                jj = j;

            if ((ii >= 0) && (jj >= 0))
            {
                variacio_mesura = punt[i].observacio[jj].mesura
- punt[i].observacio[ii].mesura;
                ok = 1;
            }
            j++;
        }
        if (ok == 1)
        {
            fs03 << setw (18) << punt[i].nom;
            fs03 << setw (17) << punt[i].coordenada_E;
            fs03 << setw (17) << punt[i].coordenada_N;
            fs03 << setw (17) << variacio_mesura << endl;
        }
    }
    fs03.close();
    getchar();
}

// *****
// Funció que guarda en un fitxer les dades juntes dels
// fitxers Punt.txt i Mesura.txt
// No s'usa (de moment)
// *****
void Fitxer_Punt_Mesura()
{
    int i, j, k;

    ofstream fs04;

```

```

fs04.open ("SORTIDA_04.txt");
fs04.precision (10);

for (i=0; i<NumTotalPunts; i++)
{
    fs04 << setw (18) << punt[i].nom;
    fs04 << setw (17) << punt[i].coordenada_E;
    fs04 << setw (17) << punt[i].coordenada_N;
    fs04 << setw (17) << punt[i].cota;
    fs04 << setw (21) << punt[i].data_inicial;
    fs04 << setw (21) << punt[i].data_final;
    fs04 << setw (12) << punt[i].num_mesures << endl;

    for (j=0; j<punt[i].num_mesures; j++)
    {
        fs04 << setw (21) << punt[i].observacio[j].data;
        fs04 << setw (21) << punt[i].observacio[j].mesura <<
endl;
    }

    for (k=0; k<90; k++)
        fs04 << " ";
    fs04 << " " << endl;
}
fs04.close();
getchar();
}

```

```

// *****
// Programa principal
// (1) Emmagatzema les dades dels fitxers d'entrada a l'estructura
// (2) És fa un menú d'inici perquè l'usuari seleccioni l'opció
// *****

```

```

void main ()
{
int i,j;
char opcio;

```

```

// *****
// (1) Emmagatzema les dades dels fitxers d'entrada a l'estructura
// *****

```

```

ifstream fp; // Declarem el fitxer d'entrada "Punt.txt"
ifstream fm; // Declarem el fitxer d'entrada "Mesura.txt"

```

```

fp.open ("Punt.txt");

```

```

if (fp.fail())

```

```

{
    printf ("ERROR!! No s'ha pogut obrir el fitxer Punt.txt");
    getchar();
}

```

```

else

```

```

{
    fm.open ("Mesura.txt");

    if (fm.fail())
        printf ("ERROR!! No s'ha pogut obrir el fitxer
Mesura.txt");
    else
    {
        for (i=0; i<NumTotalPunts; i++)
        {
            fp >> punt[i].nom;
            fp >> punt[i].coordenada_E;
            fp >> punt[i].coordenada_N;
            fp >> punt[i].cota;
            fp >> punt[i].data_inicial;
            fp >> punt[i].data_final;
            fp >> punt[i].num_mesures;

            j=0;
            while ((j<punt[i].num_mesures) && (!fm.eof()))
            {
                fm >> nompunt;
                fm >> datapunt;
                fm >> m_punt;

                if (strcmp (nompunt, punt[i].nom)==0)
                {
                    punt[i].observacio[j].data = datapunt;
                    punt[i].observacio[j].mesura = m_punt;
                }
                j++;
            }
            cout << "Carregat el punt " << punt[i].nom << endl;
        }
    }
    fm.close();
}
fp.close();

cout << "\nCarregades amb exit les dades del fitxer a la memoria" <<
endl;
cout << "\nPulsar una tecla per continuar ... ";
getchar();

// *****
// (2) És fa un menú d'inici perquè l'usuari seleccioni l'opció
// *****

opcio = '1'; // Per poder entrar en el 'while' d'acontinuació

while ((opcio>48) && (opcio<53))
{
    system ("cls");
    cout << "\n\n\n\n\n" << endl;
    cout << "\n 1. Variacio de 'h' en el pla Est-Nord" << endl;
    cout << "\n 2. Trobar punts propers d'un punt determinat" <<
endl;
    cout << "\n 3. Variacio de 'h' en un temps determinat en el pla
Est-Nord" << endl;
}

```



```
cout << "\n 4. Sortir" << endl;
cout << "\n\n\n Indicar opcio ";
opcio = getchar();
getchar();

system ("cls");

if (opcio=='1')
{
    primer_cas();
    cout << "\n\n\n\n\n" << endl;
    cout << "\nResultats guardats en el fitxer " << endl;
    cout << " 'SORTIDA_01_Variacio_Temporal_h.txt' " << endl;
    cout << "\nPulsar una tecla per continuar ... ";
    getchar();
}

if (opcio=='2')
{
    segon_cas();
    cout << "\n\n" << endl;
    cout << "\nResultats tambe guardats en el fitxer " << endl;
    cout << " 'SORTIDA_02_Punts_Propers.txt' " << endl;
    cout << "\nPulsar una tecla per continuar ... ";
    getchar();
}

if (opcio=='3')
{
    tercer_cas();
    cout << "\n\n\n\n\n" << endl;
    cout << "\nResultats guardats en el fitxer " << endl;
    cout << " 'SORTIDA_03_Variacio_h_temps_determinat.txt' "
<< endl;
    cout << "\nPulsar una tecla per continuar ... ";
    getchar();
}

if (opcio=='4')
    opcio = '5';
}
}
```