

# ESTUDI DE LA DEFORMACIÓ I DELS DICS CLÀSTICS EN LES BRETRES SINOROGÈNIQUES DEL MARGE ORIENTAL DE LA CONCA DE L'EBRE ENTRE OLESA DE MONTSERRAT I VACARISSES



## Índex

Resum .....	1
1. Introducció i objectius del treball .....	2
1.1. Plantejament del treball .....	2
1.2. Situació geogràfica i geològica .....	2
1.3. Objectius .....	3
2. Metodologia .....	3
2.1. Recerca bibliogràfica .....	3
2.2. Treball de camp .....	3
2.3. Anàlisi estructural .....	3
2.4. Anàlisi mineralògica i microestructura dels dics clàstics .....	4
3. Antecedents .....	4
3.1. Antecedents sobre la geologia del marge oriental de la conca de l'Ebre .....	4
3.2. Antecedents sobre els dics clàstics .....	5
3.2.1. Introducció als dics clàstics .....	5
3.2.2. Processos de formació dels dics clàstics .....	5
3.3. Factors de control en la seva formació. Règim d'esforços i fractures preexistents .....	6
3.4. Importància geològica i implicacions dels dics clàstics .....	6
3.5. Perspectives de recerca actuals .....	6
4. Resultats .....	7
4.1. Les unitats sedimentàries de l'àrea d'estudi .....	7
4.2. Estructura general de l'àrea d'estudi .....	7
4.3. Mesoestructures presents a la Fm. Bretxes del Cairat .....	9
4.3.1. Fractures (diàclasis, falles i venes) .....	9
4.3.2. Estructures de deformació als còdols (fractures intraclastos i marques de pressió) .....	10
4.3.3. Dics clàstics .....	11
4.4. Estudi composicional i microestructura dels dics clàstics .....	13
4.4.1. Difraccions de Raig X .....	13
4.4.2. Microscòpia petrogràfica de la mostra V25 .....	13
5. Discussió .....	14
5.1. Deformació regional i context estructural .....	14
5.2. Evidències de deformació postdeposicional en còdols i matriu .....	15
5.3. Característiques i formació dels dics clàstics .....	15
5.4. Interacció fluids-tectònica .....	16
5.5. Episodis d'injecció i interpretació microestructura .....	16
5.6. Limitacions i recerca futura .....	17
6. Conclusions .....	17
7. Agraïments .....	18
8. Bibliografia .....	18
Annexos .....	20
Annex 1. Localització sobre fotografia aèria de les mesures de cabussament i les mostres .....	20
Annex 2: Resultats de les difraccions de raig X .....	21

## Resum

Aquest treball analitza la presència de dics clàstics a les formacions Mediona, Bretxes del Cairat i La Salut, a la zona compresa entre Olesa de Montserrat i Vacarisses, dins el marge nord-est de la Conca de l'Ebre. L'objectiu principal és descriure les característiques morfològiques i estructurals d'aquests dics i entendre els processos que poden haver intervingut en la seva formació.

Per fer-ho, s'han combinat observacions de camp, mesures estructurals, anàlisi de làmines primes amb microscòpia petrogràfica i difracció de raigs X. Els dics mostren traçats irregulars i relacions evidents amb l'estratificació i els còdols de la matriu, fet que suggereix un control tectònic en la seva propagació. També s'han identificat diversos episodis d'injecció amb fluids de composició diferent i signes de compactació posterior.

Els resultats suggereixen que la formació dels dics podria estar relacionada amb processos de fluïdificació del sediment associats a deformació tectònica. Aquesta interpretació, reforçada per l'evidència microestructural i composicional, indica una injecció sincrònica amb la transpressió alpina. L'estudi permet aprofundir en la dinàmica dels dics clàstics en marges de conques sinorogèniques i aporta noves dades sobre l'evolució tectonosedimentària del marge oriental de la Conca de l'Ebre.

## Resumen

Este trabajo analiza la presencia de diques clásticas en las formaciones Mediona, Brechas del Cairat y La Salut, en la zona comprendida entre Olesa de Montserrat y Vacarisses, dentro del margen noreste de la Cuenca del Ebro. El objetivo principal es describir las características morfológicas y estructurales de estos diques y comprender los procesos que podrían haber intervenido en su formación.

Para ello, se han combinado observaciones de campo, medidas estructurales, análisis de láminas delgadas con microscopía petrográfica y difracción de rayos X. Los diques presentan trazados irregulares y relaciones evidentes con la estratificación y los cantos de la matriz, lo que sugiere un control tectónico en su propagación. También se han identificado varios episodios de inyección con fluidos de diferente composición y signos de compactación posterior.

Los resultados sugieren que la formación de los diques podría estar relacionada con procesos de fluidificación del sedimento asociados a deformación tectónica. Esta interpretación, respaldada por evidencias microestructurales y composicionales, apunta a una inyección sincrónica con la transpresión alpina. El estudio permite profundizar en la dinámica de los diques clásticos en márgenes de cuencas sinorogénicas y aporta nuevos datos sobre la evolución tectonosedimentaria del margen oriental de la Cuenca del Ebro.

## Abstract

This study analyses the presence of clastic dikes in the Mediona, Bretxes del Cairat and La Salut formations, located in an area between Olesa de Montserrat and Vacarisses, within the northeastern margin of the Ebro Basin. The main objective is to describe the morphological and structural characteristics of these dikes and to understand the processes that may have contributed to their formation.

To achieve this, field observations, structural measurements, thin-section analysis using petrographic microscopy, and X-ray diffraction were combined. The dikes show irregular paths and clear relationships with stratification and matrix clasts, which suggest a tectonic control on their propagation. Several injection episodes involving fluids of different compositions and signs of post-injection compaction were also identified.

The results suggest that dike formation may be related to sediment fluidization processes associated with tectonic deformation. This interpretation, supported by microstructural and compositional evidence, indicates a synchronous injection with Alpine transpression. The study provides insights into the dynamics of clastic dikes along the margins of synorogenic basins and contributes new data to the tectonosedimentary evolution of the eastern margin of the Ebro Basin.

# 1. Introducció i objectius del treball

## 1.1. Plantejament del treball

Estudis recents en les formacions de bretxes i conglomerats paleògens a la zona compresa entre Olesa de Montserrat i Vacarisses (Druguet et al., 2024) han posat de manifest un conjunt d'estructures sedimentàries i tectòniques que inclouen, entre altres, injectites o dics clàstics. Aquestes estructures s'han observat al llarg de la riera de Sant Jaume i de la Torre.

Amb aquest treball es planteja especialment l'estudi detallat dels dics clàstics i la seva relació amb altres estructures, així com amb l'estructura regional, per comprendre millor els processos geològics i tectònics que han modelat aquesta àrea.

## 1.2. Situació geogràfica i geològica

La riera de la Torre i la seva continuació cap al sud, aigües avall, com a riera de Sant Jaume, pertany als termes municipals d'Olesa de Montserrat, Viladecavalls i Vacarisses, a les comarques del Baix Llobregat i Vallès Occidental. És afluent de la Riera del Gaià, que és afluent del Riu Llobregat (Bach et al., 2010).

Des del punt de vista geogràfic i geològic (figura 1A), l'àrea d'estudi se situa al marge sud-est de la Conca de l'Ebre en contacte amb la Serralada Prelitoral, que forma part del Sistema Mediterrani Català. La figura 1B mostra amb més detall la situació geològica de la zona d'estudi. Aquesta està inclosa dins la geozona 328 "Estació d'Olesa – Riera de Sant Jaume" recollida a l'Inventari d'Espais d'Interès Geològic de Catalunya (López-Blanco i Gómez Gras, 2000).

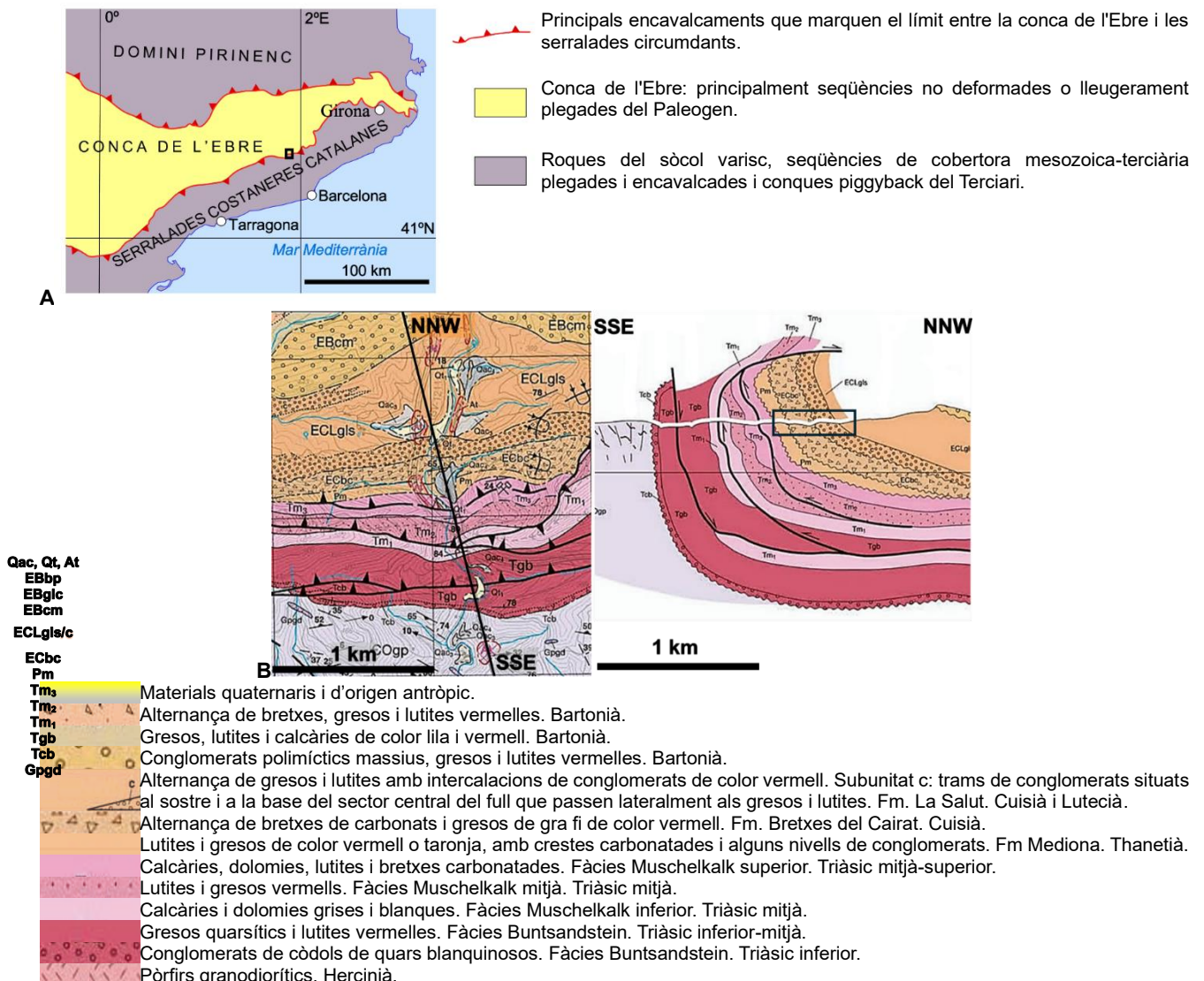


Figura 1: A: mapa geològic esquemàtic del marge oriental de la conca de l'Ebre (modificat de Druguet et al., 2024). B: fragment del mapa ICGC 1:25.000 (ICGC, 2002). C: Fragment del tall geològic VII-VII' del mapa ICGC 1:25.000 (ICGC, 2002), amb la zona d'estudi enquadrada.

### 1.3. Objectius

L'objectiu general d'aquest treball és aportar informació complementària a la ja existent sobre l'evolució tectonosedimentària de la vora oriental de la conca de l'Ebre i, en general, sobre els complexos processos tectonosedimentaris que tenen lloc en conques sinorogèniques.

Per altra banda, els objectius específics que s'han determinat per donar resposta a l'objectiu general són:

- Analitzar les estructures geològiques i la deformació observada a la zona d'estudi, amb un enfocament especial en els dics clàstics i les venes de calcita.
- Realitzar un estudi estructural i microestructural de l'estratificació, els dics clàstics i les venes de calcita mitjançant dades de camp, microscòpia petrogràfica i difracció de raigs X.
- Interpretar l'evolució i desenvolupament del procés de formació dels dics clàstics.

Aquest estudi aporta informació complementària a les recerques prèvies sobre els processos tectonosedimentaris de la zona, amb un enfocament especial en la deformació i la formació de dics clàstics.

## 2. Metodologia

La metodologia emprada es divideix en quatre blocs: recerca bibliogràfica, treball de camp, anàlisi estructural i anàlisi mineralògica i microestructural.

### 2.1. Recerca bibliogràfica

La recerca bibliogràfica s'ha basat en la revisió d'articles científics relacionats amb l'estudi dels dics clàstics, així com en publicacions sobre la geologia de la zona d'estudi.

### 2.2. Treball de camp

El treball de camp ha consistit en tres sortides durant les quals s'ha realitzat un transecte de sud a nord a través de la riera de Sant Jaume i la riera de la Torre. Al llarg d'aquest transecte s'han definit 40 parades, on s'han mesurat els cabussaments de l'estratificació, amb l'objectiu d'elaborar un tall geològic de la zona; i els cabussaments dels dics clàstics i de les venes de calcita, per analitzar-ne l'orientació i identificar possibles famílies estructurals (Vegeu Figura A1.1, Annex 1).

Durant aquestes sortides també es van recollir mostres dels dics clàstics i de la roca encaixant per analitzar-ne la litologia i preparar làmines primes. Les mostres recollides corresponen a V32, V34 i V25. La lletra "V" fa referència a Vacarisses, la zona d'estudi, i el número indica la parada corresponent dins del transecte.

Les mostres V32 i V34 es van agafar a la parada 32 i 34, respectivament. Amb l'ajuda d'un martell es van extreure, per separat, el dic i la roca sorrenca encaixant, i es van destinar a l'anàlisi per difracció de raig X. La mostra V25 es va recollir a la parada 25, i, en aquest cas, es va obtenir una única mostra que incloïa tant el dic clàstic com la roca encaixant. Aquesta mostra es va emprar per elaborar dues làmines primes.

Un cop analitzada la mostra V25 amb microscòpia petrogràfica, es van recollir tres mostres addicionals a la mateixa localitat: "V25\_blanc", "V25\_taronja", i "V25\_encaixant". Els noms fan referència a diferents parts del dic clàstic (blanquinosa i taronjada) i a la roca encaixant. Totes aquestes mostres es van analitzar mitjançant difracció de raigs X.

### 2.3. Anàlisi estructural

Durant el treball de camp, les dades d'orientacions es van recollir amb l'aplicació GeoID per a mòbils, i posteriorment es van analitzar mitjançant projeccions estereogràfiques utilitzant el programari Stereonet (Allmendinger 2011-2023). Es van realitzar projeccions separades per a l'estratificació, els dics clàstics i les venes de calcita.

Per a la projecció estereogràfica de l'orientació de l'estratificació als materials paleògens, a partir dels pols de les diferents superfícies mesurades es va calcular el *Cylindrical Best Fit*, que permet comprovar si la variació en orientacions s'ajusta a un plegament de tipus cilíndric. Aquestes dades

es van emprar per elaborar un tall geològic esquemàtic de la zona i interpretar l'estructura en direcció sud-nord.

En l'anàlisi estereogràfica de les venes de calcita es van projectar els plans i els pols dels plans i es van generar contorns de densitat per 1% d'àrea. Aquests contorns, representats a intervals de 2% fins a un màxim del 26%, indiquen les zones amb major concentració del pols i permeten identificar diferents famílies de venes.

De manera similar, a la projecció estereogràfica dels discs clàstics es van calcular els pols dels plans de cabussament i els seus contorns de densitat per 1% d'àrea. Aquests contorns, que es mostren en intervals de 2% fins a un valor màxim del 12%, han permès identificar diferents famílies de discs dins de l'àrea d'estudi.

#### **2.4. Anàlisi mineralògica i microestructura dels discs clàstics**

Les mostres V32, V34, V25\_blanç, V25\_taronja, i V25\_encaixant es van analitzar mitjançant difracció de raigs X per determinar-ne la composició mineralògica. Aquestes anàlisis les va dur a terme el Dr. Jordi Ibáñez al laboratori de difracció de raigs X del Geo3BCN i han permès comparar la composició dels discs clàstics amb la de la roca sedimentària encaixant.

La mostra V25 es va analitzar amb microscòpia petrogràfica a partir de dues làmines primes elaborades al laboratori de làmines primes de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). La primera làmina, anomenada V25-top, es va preparar en orientació subhoritzontal i perpendicular al dic; la segona, V25-vertical, en orientació subvertical i també perpendicular al dic. Aquesta anàlisi ha permès identificar la litologia i establir una seqüència relativa del procés de formació dels discs clàstics.

### **3. Antecedents**

#### **3.1. Antecedents sobre la geologia del marge oriental de la conca de l'Ebre**

A l'àrea d'estudi, els materials paleògens del marge sud de la Conca de l'Ebre es disposen discordantment sobre materials triàsics de la Serralada Prelitoral, els quals, al mateix temps, es disposen sobre el sòcol varisc en discordança verticalitzada. El sòcol està constituït per metasediments paleozoics i granitoides tardivariscos, mentre que la cobertura inclou sediments triàsics i paleògens. Aquests darrers, objecte d'aquest estudi, ja pertanyents a la unitat de la Conca de l'Ebre (ICGC, 2010).

L'estructura dels materials paleògens a l'àrea d'estudi és molt complexa (figura 1B), amb una discordança progressiva sintectònica ben manifesta (López-Blanco et al., 2000). Localment, la sèrie es presenta invertida i, segons el mapa geològic 1:25.000 d'Olesa de Montserrat (ICGC, 2002), aquesta inversió es deu a un plec sinclinal tombat associat a encavalcaments amb orientació E-W, desenvolupats durant l'orogènia alpina (López-Blanco, Gómez Gras, 2000; López-Blanco 2006). Aquestes estructures afecten tant els materials paleozoics com als mesozoics i paleògens, i es relacionen amb les deformacions generades durant la fase compressiva paleògena dels Catalànids, responsables del desenvolupament de plecs i encavalcaments associats a la reactivació de fractures profundes (Anadón et al., 1979).

Les principals unitats geològiques paleògenes presents a l'àrea d'estudi són la Formació Mediona, les Bretxes del Cairat i la Formació La Salut (ICGC, 2002).

La formació Mediona es disposa sobre les unitats sedimentàries triàsiques, separada per una paraconformitat marcada per la presència de microcodiums al substrat. La seva edat es limita a l'Ipresià superior o Tanetià inferior, d'acord amb l'anàlisi de caròfits (Anadón, 1978; Gómez-Paccard et al., 2012). Es tracta d'una unitat paleocena constituïda principalment per múltiples paleosols, crostes carbonatades, gresos i lutites de color vermell o taronja, amb alguns nivells de conglomerats, dipositats en un ambient de plana al·luvial.

La formació Bretxes del Cairat (Anadón, 1978) atribuïda al Cuisià, es diposita discordantment sobre la formació Mediona. Està constituïda per dipòsits de ventall al·luvial proximal formats per bretxes derivades principalment dels materials triàsics, amb intercalacions greso-lutítiques i paleosols. A la Riera de Sant Jaume assoleix un gruix màxim de 150 m, i es disposa en contacte discordant tant amb la formació Mediona com amb el Muschelkalk superior.

La formació La Salut, datada entre el Cuisià i el Lutecià, presenta dos trams de conglomerats que passen lateralment a gresos i lutites. Els clasts són angulosos o subarrodonits amb composició dominantment carbonatada i una matriu constituïda per gresos i lutites. S'interpreta com la representació de les fàcies mitjanes i distals de ventalls al·luvials, mentre que els trams més conglomeràtics corresponen a les fàcies més proximals.

En conjunt, la sèrie del Terciari inferior a l'àrea d'estudi està formada, de base a sostre, per les Formacions Mediona (Paleocè) i Bretxes del Cairat (Eocè inferior). Aquesta última formació es considera la resposta sedimentària a l'inici de l'activitat tectònica alpina a la zona. Aquest comportament sintectònic és coherent amb els patrons de subsidència tectònica identificats a la zona de Montserrat, on la deformació relacionada amb la flexura alpina va condicionar l'apilament i la distribució dels sediments (Gómez-Paccard et al., 2012). Les Bretxes del Cairat es disposen discordantment al damunt dels materials infrajacentes (paleògens i triàsics), especialment a mesura que ens apropem a la Serralada Prelitoral.

Des del Cretaci superior, la regió va funcionar com un marge passiu de l'orogen pirinenc, que es començava a formar com a conseqüència de la convergència entre les plaques Ibèrica i Europea (López-Blanco, 2006). Durant el Paleocè, es va dipositar la Formació Mediona, integrada per sediments continentals amb una elevada presència de paleosols. Aquests sediments reflecteixen una deposició lenta, interrompuda per llargs períodes d'estabilitat, característics del marge passiu de conca (López Blanco et al., 2000).

Amb l'avanç de la deformació pirinenca cap al sud, les falles tardivarisques es van reactivar, produint moviments inversos i direccionals (Anadón et al., 1985; Guimerà, 1994). Aquest context de deformació va generar una diferenciació geològica del marge sud-est de la conca de l'Ebre, donant lloc a la sedimentació de materials continentals com les Bretxes del Cairat (Anadón et al., 1985). Aquestes bretxes es vinculen amb processos d'erosió dels materials triàsics i amb estructures tectòniques, com plecs i encavalcaments formats durant aquesta etapa compressiva.

El caràcter proximal i sintectònic d'aquestes unitats ha afavorit la generació de discordances sintectòniques clarament visibles a la zona (Anadón et al., 1985). Un dels elements més destacats d'aquesta formació és la presència de dics clàstics i venes de calcita, que es localitzen especialment abundants en les formacions Bretxes del Cairat i La Salut.

## **3.2. Antecedents sobre els dics clàstics**

### **3.2.1. Introducció als dics clàstics**

Els dics clàstics són estructures geològiques originades per la injecció de material clàstic no consolidat a través de fractures o esquerdes, sovint associades a processos d'hydrofracturació (Hurst et al., 2011). Aquestes fractures poden ser preexistents a la roca encaixant, o bé generar-se a conseqüència de la pressió exercida pel fluid injectat durant el procés.

Aquestes estructures poden presentar-se com a dics, quan són discordants respecte a l'estratificació, o com a sills, quan són concordants, i sovint impliquen la remobilització de sediments clàstics (Jolly & Lonergan, 2002).

Tot i que els dics clàstics ja es van descriure per primer cop fa gairebé dos-cents anys (Murchison, 1827; Hurst et al., 2011), no va ser fins a temps més recents que es va reconèixer la seva rellevància, especialment pel seu paper en dipòsits d'hydrocarburs (Dixon et al., 1995; Hurst et al., 2011). A més, la seva importància també rau en que permeten comprendre la dinàmica de fluids i poden actuar com a indicadors d'activitat tectònica (Jolly & Lonergan, 2002).

### **3.2.2. Processos de formació dels dics clàstics**

#### **3.2.2.1. Condicions necessàries**

Perquè es produeixi la formació d'un dic clàstic, cal la presència de sorres no consolidades que permetin la seva remobilització (Hurst et al., 2011). Aquestes sorres han d'experimentar una sobrepressió de fluids, prou per suspendre els grans dins del fluid i, en superar la pressió de fractura de la roca encaixant, provocar la seva hydrofracturació, podent-se produir la injecció ascendent del material. A més, és imprescindible la presència d'un segell de baixa permeabilitat, com una capa argilosa, que actuï com a barrera al flux del fluid (Jolly & Lonergan, 2002). Aquest segell impedeix la

dissipació de la pressió, fet que permet que la sobrepressió s'acumuli fins a generar la injecció. Sense aquest segell, la pressió es perdria abans d'assolir el llindar necessari per a la formació del dic clàstic.

### **3.2.2.2. Mecanismes d'injecció**

Segons Monnier et al. (2015), es poden distingir diversos mecanismes d'injecció de dics clàstics:

1. Injecció activa de sorra, amb tres possibles situacions:
  - a. Injecció forçada, generada per la sobrepressió d'un cos de sora durant l'enterrament. Quan la pressió dels fluids intersticials supera la resistència a la fractura de la roca hoste, es generen fractures hidràuliques perpendiculars al mínim esforç compressiu. Aquestes s'omplen de sorra i fluid quan se supera la velocitat de fluïdificació.
  - b. Injecció subtrusiva, la qual té lloc quan els sediments no litificats omplen ràpidament fractures o falles actives o reactivades, impulsats per una infrapressió local i facilitats per la pressió de fluid.
  - c. Liqüefacció induïda per la sismicitat, en què cossos sorrencs subsuperficials poc profunds, es transformen en un fang fluïdificat i s'injecten cap amunt a través de fissures, arribant a formar, en alguns casos, volcans de sorra.
2. Injecció passiva de sorra, que dona lloc a dics generats pel lent reompliment gravitatori de fractures o buits, amb aigua o sense.

### **3.3. Factors de control en la seva formació. Règim d'esforços i fractures preexistents**

L'orientació dels dics clàstics està fortament condicionada pel camp d'esforços tectònics regional. En condicions d'estrès purament gravitatòries ( $\sigma_1$  vertical), els dics tendeixen a ser verticals però multidireccionals. En canvi, en ambients tectònicament actius, la seva orientació pot variar segons l'orientació i magnitud relativa dels esforços principals i la presència de discontinuïtats estructurals (Monnier et al., 2015; Jolly & Lonergan, 2002).

Les fractures preexistents en la roca encaixant poden actuar com a camins preferents d'injecció. Quan la pressió del fluid intersticial excedeix l'esforç normal aplicat a aquestes fractures, aquestes es poden dilatar i permetre el pas de sediment fluïditzat. Aquest mecanisme pot generar trajectòries irregulars i geometries en ziga-zaga, a mesura que el material injectat s'adapta als diversos conjunts de fractures (Jolly & Lonergan, 2002).

### **3.4. Importància geològica i implicacions dels dics clàstics**

Els dics clàstics tenen rellevància en el context de la geologia estructural i sedimentària. D'una banda, el seu estudi pot aportar informació en la reconstrucció de l'evolució de conques sedimentàries, ja que permet identificar períodes d'activitat tectònica, així com canvis en el règim d'esforços i condicions de sobrepressió (Monnier et al., 2015). D'altra banda, també resulten útils en l'estudi de la migració de fluids, pel fet que actuen com a canals de transmissió de fluids dins del subsol, fet que els confereix un paper rellevant en sistemes petrolífers i aquífers (Hurst et al., 2011).

Finalment, també poden actuar com a indicadors de processos tectonosedimentaris complexos, ja que posen de manifest la interacció entre els esforços tectònics i la sedimentació, i evidencien dinàmiques de deformació difícils de reconstruir mitjançant altres estructures (Jolly & Lonergan, 2002).

### **3.5. Perspectives de recerca actuals**

Malgrat els avenços recents en el coneixement dels dics clàstics, encara persisteixen nombroses incògnites sobre els seus mecanismes de formació i evolució.

Segons Hurst et al. (2011), algunes de les línies de recerca obertes inclouen la interpretació dels fluxos interns, les microestructures desenvolupades durant el procés d'injecció, així com la seva integració en models quantitius de l'evolució de conques sedimentàries.

A més, es posa èmfasi en la necessitat de dur a terme experiments de laboratori centrats en els mecanismes d'injecció de sorres, amb l'objectiu d'esclarir les condicions físiques específiques en què es formen els dics. Aquests estudis experimentals serien essencials per interpretar adequadament les dades de camp i per al desenvolupament de models teòrics robustos sobre la remobilització i injecció de sediments.

## 4. Resultats

### 4.1. Les unitats sedimentàries de l'àrea d'estudi

Les unitats sedimentàries principals de l'àrea d'estudi corresponen a la Formació Mediona, la Formació Bretxes del Cairat i la Formació la Salut.

La Formació Mediona es caracteritza per lutites de coloració vermellosa a ataronjada, de textura fina, amb intercalacions de nivells lenticulars de gresos de gra mitjà a fi. Els nivells gresosos es disposen en cossos discontinus, sovint amb límits difusos. Aquesta unitat presenta un aspecte més homogeni en comparació amb les altres dues formacions, amb menys variabilitat granulomètrica i sense presència significativa de còdols. En aquesta unitat s'han identificat alguns dics clàstics, en menor proporció que en les altres formacions.

La Formació Bretxes del Cairat (figura 2A) presenta una successió d'alternances de lutites i gresos de gra fi amb nivells de bretxes heteromètriques, habitualment de coloració vermellosa. Els còdols són de composició predominantment carbonatada, amb presència de calcàries i dolomies d'edat triàsica, així com còdols de gresos triàsics, probablement de les fàcies Buntsandstein i/o Muschelkalk mitjà, i còdols de pissarres i cornianes paleozoiques, en menor proporció. La matriu és de textura fina, de tipus lutític, i els còdols, angulosos o subangulosos, amb mala selecció. Pel que fa al suport, s'observen tant zones matriu-suportades com clast-suportades.

La formació La Salut està constituïda per bretxes i conglomerats massius, amb clasts de mida i composició variades, generalment subangulosos i mal seleccionats, i amb presència puntual de gresos. La matriu és de textura fina, i els nivells presenten un aspecte massiu o poc estratificat. Aquesta unitat mostra una similitud litològica amb les Bretxes del Cairat, fet que en dificulta la diferenciació in situ. Tant a La Salut com a les Bretxes del Cairat, s'han identificat nombrosos dics clàstics, amb mides i morfologies variades.

### 4.2. Estructura general de l'àrea d'estudi

Els estrats de la zona d'estudi presenten cabussaments predominantment cap al nord-nord-oest. El tall geològic representat a la figura 2B mostra un transecte d'uns 280 metres, traçat de sud a nord al llarg de la riera de Sant Jaume i la riera de la Torre. Aquest s'ubica a l'oest de la planta d'Asfalts Egara S.L., entre la línia R4 de ferrocarril (Vacarisses) i l'autopista de Montserrat, i talla la carretera BV-1211.

El transecte travessa les formacions Mediona, Bretxes del Cairat i la Salut, i reflecteix una disminució progressiva de l'angle de cabussament de l'estratificació cap al nord. En el tall també s'hi representa, de manera qualitativa i mitjançant un gradient de color, la presència de dics clàstics a cada formació. Els tons clars indiquen menor o cap presència i els foscos, major abundància. Els dics es concentren principalment a les formacions Bretxes del Cairat i La Salut. Més enllà del punt on finalitza el tall, el transecte es va continuar cap al nord, però no s'hi van observar més dics clàstics.

L'anàlisi de la projecció estereogràfica de l'estratificació i dels seus pols (figura 2C), mostra una disminució progressiva del cabussament dels estrats de sud a nord al llarg del tall geològic. Concretament, s'observa que el pla més cabussant es localitza al sud, a l'inici del tall, mentre que el cabussament més suau es troba al nord. L'anàlisi estadística dels pols de l'estratificació (*Cylindrical Best Fit*) presenta un cercle major en direcció Nord-Sud. Aquesta configuració encaixa aproximadament amb un plegament d'eix cilíndric subhoritzontal E-O, amb un cabussament d'aproximadament 10° cap a l'oest.

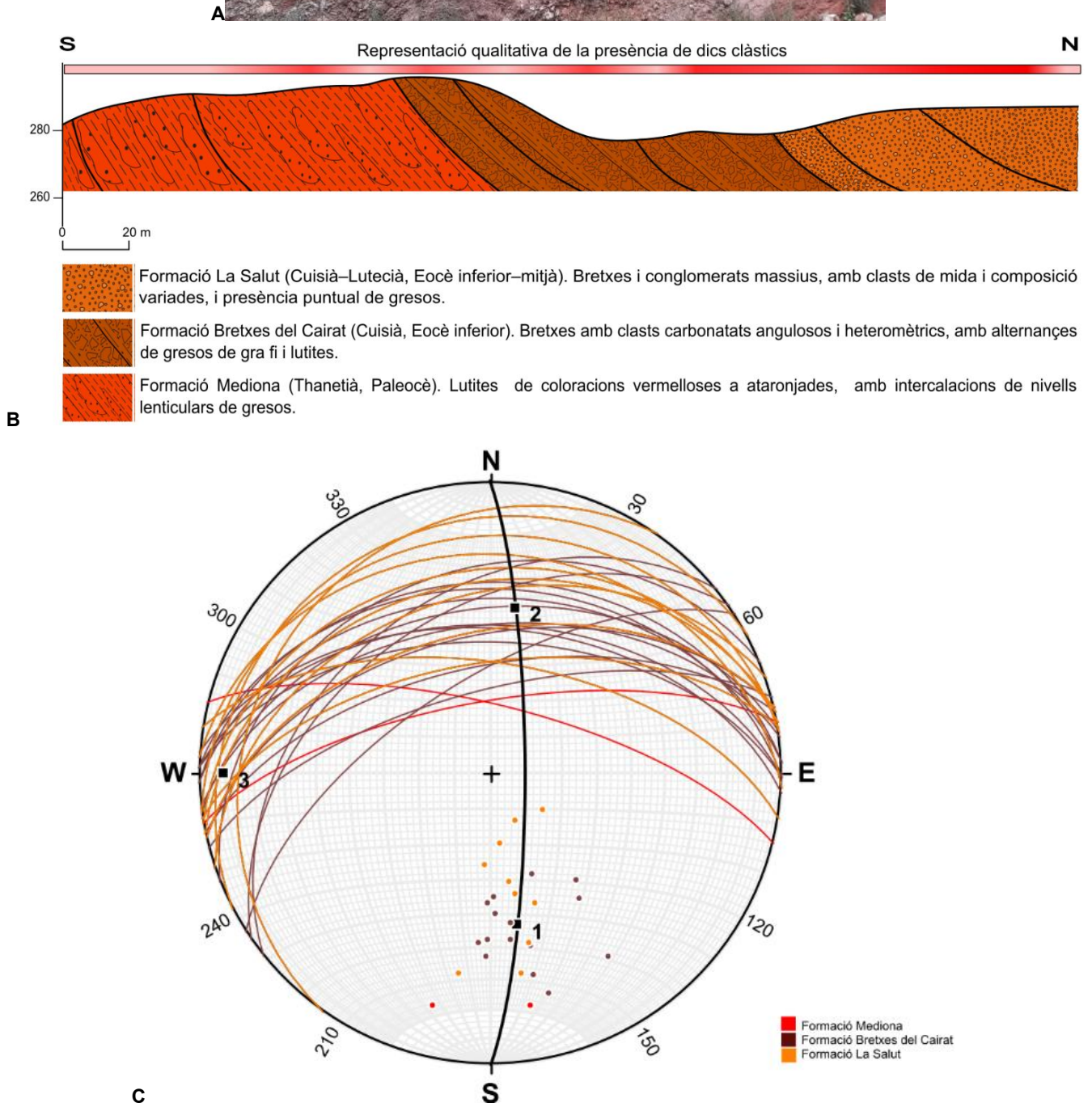


Figura 2: A: Vista general de la Formació Bretxes del Cairat en un talús de la carretera BV-1211. B: Tall geològic de l'àrea d'estudi, amb representació de l'evolució del cabussament de l'estratificació de sud a nord i de la presència de dics clàstics de forma qualitativa. Correspon a un segment del tall SSE-NNW de la figura 1B. C: Projecció estereogràfica dels cabussaments de l'estratificació (28 mesures). En negre s'hi representa el càlcul del *Cylindrical Best Fit*. Els colors vermell, marró i taronja corresponen a les formacions Mediona, Bretxes del Cairat, i La Salut, respectivament.

### 4.3. Mesoestructures presents a la Fm. Bretxes del Cairat

#### 4.3.1. Fractures (diàclasis, falles i venes)

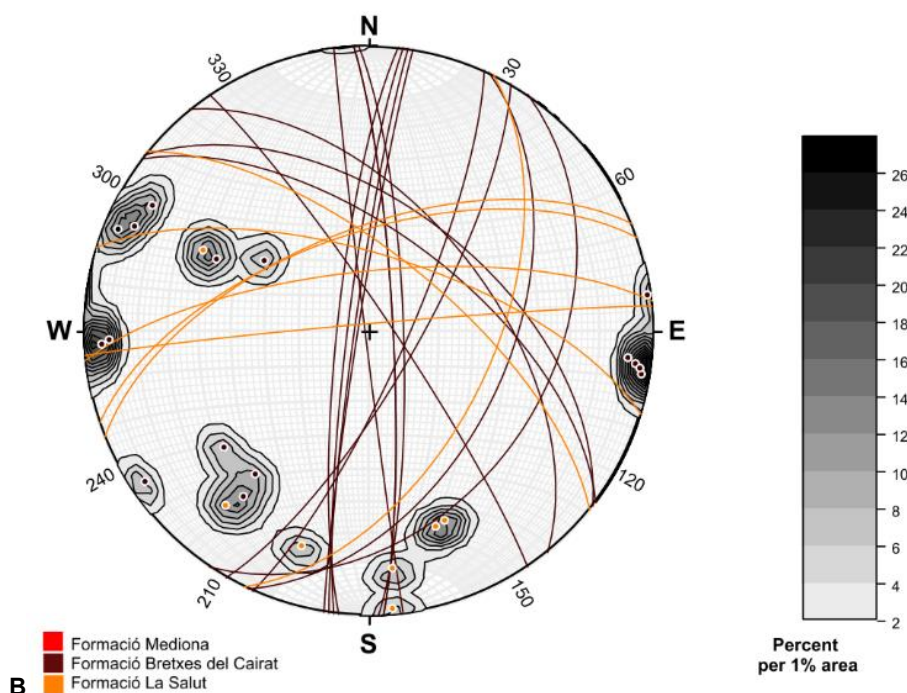
Als afloraments de les Bretxes del Cairat s'hi observen diverses fractures, corresponents a diàclasis i/o a falles menors. Entre aquestes, destaquen les esquerdes de tensió associades als dics clàstics, especialment visibles en zones on dos dics es bifurquen deixant un bloc de roca encaixant entre ells.

Un altre tipus de fractura que destaca i és predominant en la zona són les venes de calcita (figura 3A) de dimensions entre mil·limètriques i centimètriques. Aquestes venes travessen la matriu i alguns còdols de les bretxes i conglomerats, i poden presentar fracturació posterior.

L'anàlisi de la projecció estereogràfica de les venes (figura 3B), a partir del càlcul dels pols i dels contorns de densitat (percentatge per 1% àrea), mostra la presència de tres famílies principals, amb concentracions màximes de pols en orientacions preferents. En concret, aquestes famílies es distribueixen seguint tres direccions predominants: SSW-NNE, NW-SE, i E-W. Els contorns de densitat indiquen que les màximes concentracions de pols es troben en aquests tres dominis, amb valors que arriben fins al 26% per 1% àrea en el cas de la família en direcció SSW-NNE.



A



B

Figura 3: A: Detall en secció obliqua d'una vena de calcita que travessa un nivell de gresos de la Formació Bretxes del Cairat. B: Projecció estereogràfica de les venes de calcita (23 mesures). Els contorns de densitat (percentatge de venes per 1% àrea) es representen en color negre. Els colors vermell, marró i taronja corresponen a les formacions Mediona, Bretxes del Cairat, i La Salut, respectivament.

#### 4.3.2. Estructures de deformació als còdols (fractures intraclasts i marques de pressió)

A les bretxes i conglomerats de matriu fina de la Formació Bretxes del Cairat s'observen múltiples indicis de deformació en còdols, que són angulosos o subangulosos i sovint lleugerament allargats. Alguns còdols mostren imbricació cap al nord, la qual cosa indica un paleoflux en direcció sud-nord, cap a l'interior de la conca de l'Ebre.

Diversos còdols, especialment alguns de litologies triàsiques de les fàcies Buntsandstein, presenten fractures intraclasts (figura 4A), similars a les descrites per Druguet et al. (2024) a la zona de la presa del Cairat (Olesa de Montserrat). Predominantment, als clastos de carbonat, s'observen contactes de pressió dissolució amb marques d'indentació entre còdols (figura 4B).



Figura 4: A: Bretxa amb còdols de diverses litologies que presenten fractures intraclasts que no afecten la matriu. B: Contacte de pressió-dissolució entre dos còdols principals i en altres còdols més petits, amb presència d'un dic clàstic que envolta un dels còdols principals. A i B corresponen a seccions subhoritzontals.

### 4.3.3. Dics clàstics

Els dics clàstics es localitzen principalment a la Formació Bretxes del Cairat i a la Formació La Salut, amb menor presència a la Formació Mediona. Destaquen per la seva coloració entre ataronjada i marronosa i una granulometria fina. Tenen mides molt variables, des de mil·limètriques fins a centimètriques, i presenten geometries irregulars, sovint en ziga-zaga, amb bifurcacions i interseccions.

El seu traçat és sinuós, amb aparença de plegament, adaptant la seva trajectòria a les heterogeneïtats litològiques i als còdols. Els dics clàstics, de sorra fina, no es barregen amb la roca encaixant, composta per gresos i bretxes, amb alguns trams més lutítics (figura 5A), i en alguns punts s'observa que tant els dics com les fractures s'aturen verticalment contra l'estratificació (figura 5B). A més, en alguns casos, els dics clàstics presenten laminacions internes ben definides (figura 5C).



Figura 5: A: Dics clàstics presents a les Bretxes del Cairat, amb traçat sinuós i sense barreja amb la roca encaixant, composta per gresos i bretxes, amb alguns trams més lutítics (secció subhoritzontal). B: Fractures i dics que s'aturen verticalment contra l'estratificació, suggerint possible control litològic (secció vertical). C: Detall de les laminacions internes d'un dic clàstic (secció subhoritzontal).

A part de les laminacions internes, en alguns dics s'observen clastes que han quedat atrapats durant la injecció (figura 6A). S'ha observat que, quan els còdols són arrodonits, els dics tendeixen a envoltar-los; en canvi, quan són allargats formant un angle elevat amb la direcció dominant del dic, els dics travessen els còdols perpendicularment (figura 6B).

L'anàlisi estereogràfica de les orientacions dels dics (figura 6C), així com dels seus pols i dels contorns de densitat (per 1% d'àrea), permet identificar una família principal amb orientació NNW-SSW i cabussament subvertical i diverses famílies secundàries associades a l'estratificació. El centre del clúster principal correspon a un pla de cabussament  $85^\circ$  en direcció  $N105^\circ$ . També s'han identificat petits grups de dics amb cabussaments verticals cap al nord o cap al sud.

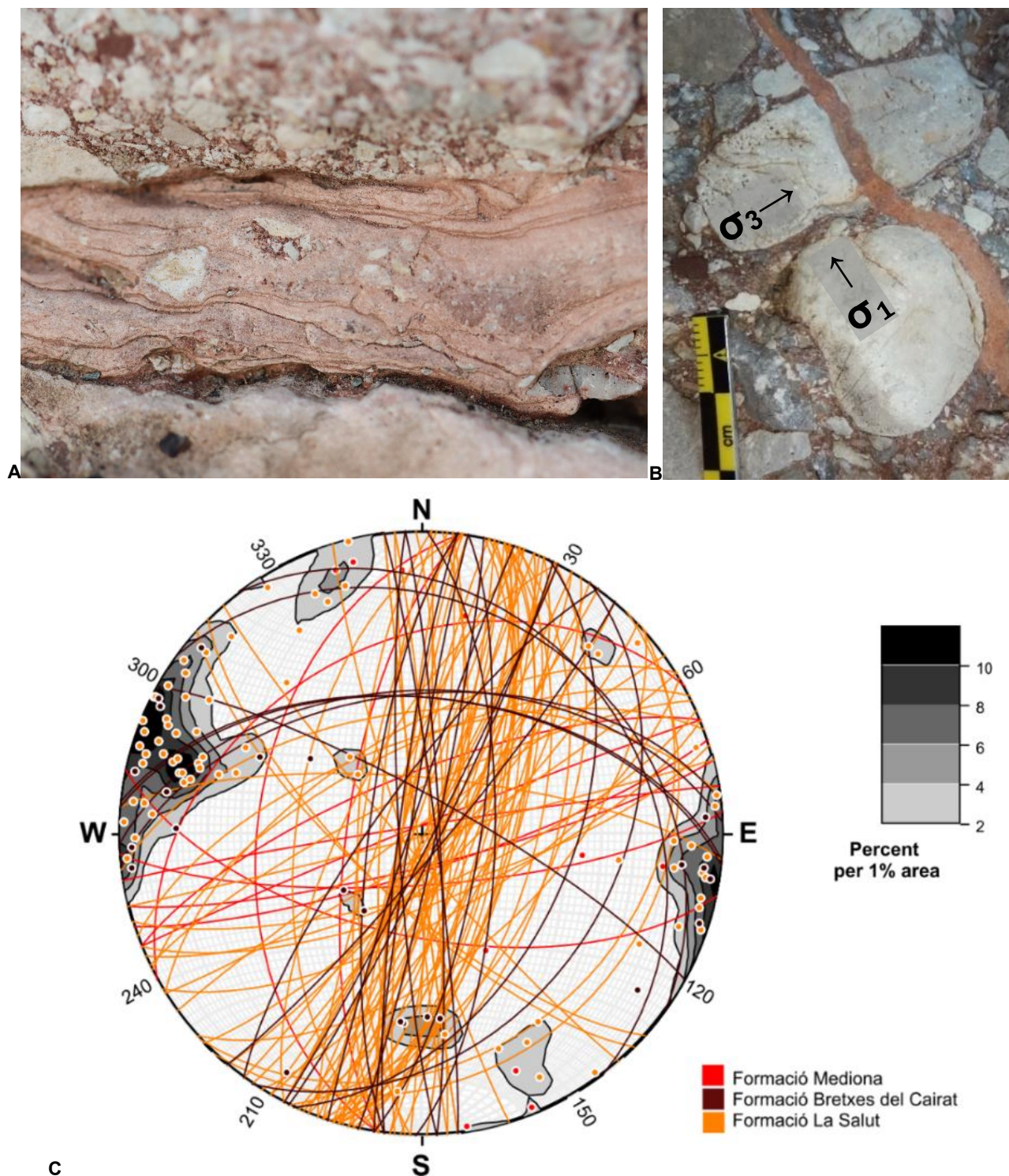


Figura 6: A: Detall de clasts atrapats dins d'un dic clàstic durant la injecció (secció subhoritzontal). B: Exemple de dic clàstic que travessa perpendicularment un còdol allargat a angle elevat i envolta un còdol arrodonit (secció subhoritzontal), i interpretació de l'orientació dels esforços principals en aquesta secció. C: Projecció estereogràfica dels dics clàstics (106 mesures). Els contorns de densitat (percentatge de venes per 1% àrea) es representen en color negre. Els colors vermell, marró i taronja corresponen a les formacions Mediona, Bretxes del Cairat, i La Salut, respectivament.

#### 4.4. Estudi composicional i microestructura dels dics clàstics

##### 4.4.1. Difraccions de Raig X

El dic i la roca encaixant de la mostra V32 (Vegeu Figura A2.1 A i B, Annex 2) presenten una composició mineralògica similar. El dic està format principalment per calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), amb presència de quars ( $\text{SiO}_2$ ) i moscovita ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ). En canvi, l'encaixant conté una proporció més elevada de quars i dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). També s'hi ha identificat moscovita  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , tot i que en quantitats menors.

Els resultats de la difracció de la mostra V34 (Vegeu Figura A2.2 A i B, Annex 2) indiquen que tant el dic clàstic com l'encaixant contenen els mateixos minerals principals: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), quars ( $\text{SiO}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), moscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ) i hematites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). No obstant això, s'observa una diferència entre el dic i l'encaixant, ja que aquest últim conté a més feldespat potàssic, que no ha estat detectat al dic.

La difracció de raigs X de la mostra V25\_taronja mostra una composició mineralògica predominantment carbonatada, amb calcita com a mineral principal, seguida de dolomita. També s'hi detecta quars, i destaca especialment la presència de barita ( $\text{BaSO}_4$ ) (vegeu Figura A2.3A, Annex 2).

La mostra V25\_ blanc presenta una composició dominada per calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), seguida de quars ( $\text{SiO}_2$ ) i dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). A diferència de la mostra taronja, no s'hi ha detectat barita ( $\text{BaSO}_4$ ) (vegeu Figura A2.3B, Annex 2).

Finalment, l'encaixant del dic clàstic de la mostra V25 mostra una composició dominada per quars ( $\text{SiO}_2$ ) i calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), amb presència d'altres minerals com moscovita ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) i dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), tot i que en menor proporció (vegeu Figura A2.4, Annex 2).

##### 4.4.2. Microscòpia petrogràfica de la mostra V25

A la secció horitzontal de la mostra V25, així com a la fotografia de camp subhoritzontal de la mostra V25 (figura 7A) s'observen tres textures (figura 7B):

1. Lutita sorrenca encaixant (color marró a la Figura 7A): és mal seleccionada, angulosa, i és matriu suportada. Els grans de sorra són angulosos i tant de calcita com de quars. Predominen els grans de calcita sobre els de quars.
2. Esparita (color blanquinós a la Figura 7A): S'observa esparita de creixement in situ, però també es veu esparita amb cares de cristalls mal definits. En aquest darrer cas és habitual trobar-hi englobats fragments angulosos de gresos o lutites encaixants, adquirint una textura de microbretxa o protocataclasita.
3. Textura micrítica i microesparítica (color taronjós a la Figura 7A). S'hi observen clastos, de mida sorra i mida llim, que principalment són de carbonat i en menor proporció de quars. Els clastos formen un bandejat que tendeix a ser paral·lel a les vores del dic. En un detall de la làmina, s'hi aprecia una petita apòfisi també de granulometria fina injectada dins l'esparita a un angle elevat, indicant que el material de granulometria fina es propaga cap a l'esparític més groller. A les vores entre aquests dos dics s'han identificat cristalls de calcita en bloc (blocky) amb formes euèdriques i de fins a 3 mm de diàmetre, amb macles i exfoliacions característiques de la calcita i sentit de creixement cap al centre del dic fi, probablement anteriors a aquest. A més, dins del dic de granulometria fina, s'hi observen venes de calcita, així com laminacions internes i evidències d'indentació per pressió-dissolució.

La làmina prima de la secció vertical de la mostra V25 presenta un cert desgast per la preparació, però encara es poden identificar trets rellevants. Es distingeix una laminació obliqua respecte a la paret del dic, ben definida per la presència de grans de mida major, així com una clara orientació preferent dels grans dins del dic. D'altra banda, en una de les vores del dic de textura micrítica i microesparítica, s'observa la presència del dic de textura esparítica (figura 7C), mentre que a l'altra vora aquest dic és inexistent o molt menys desenvolupat.

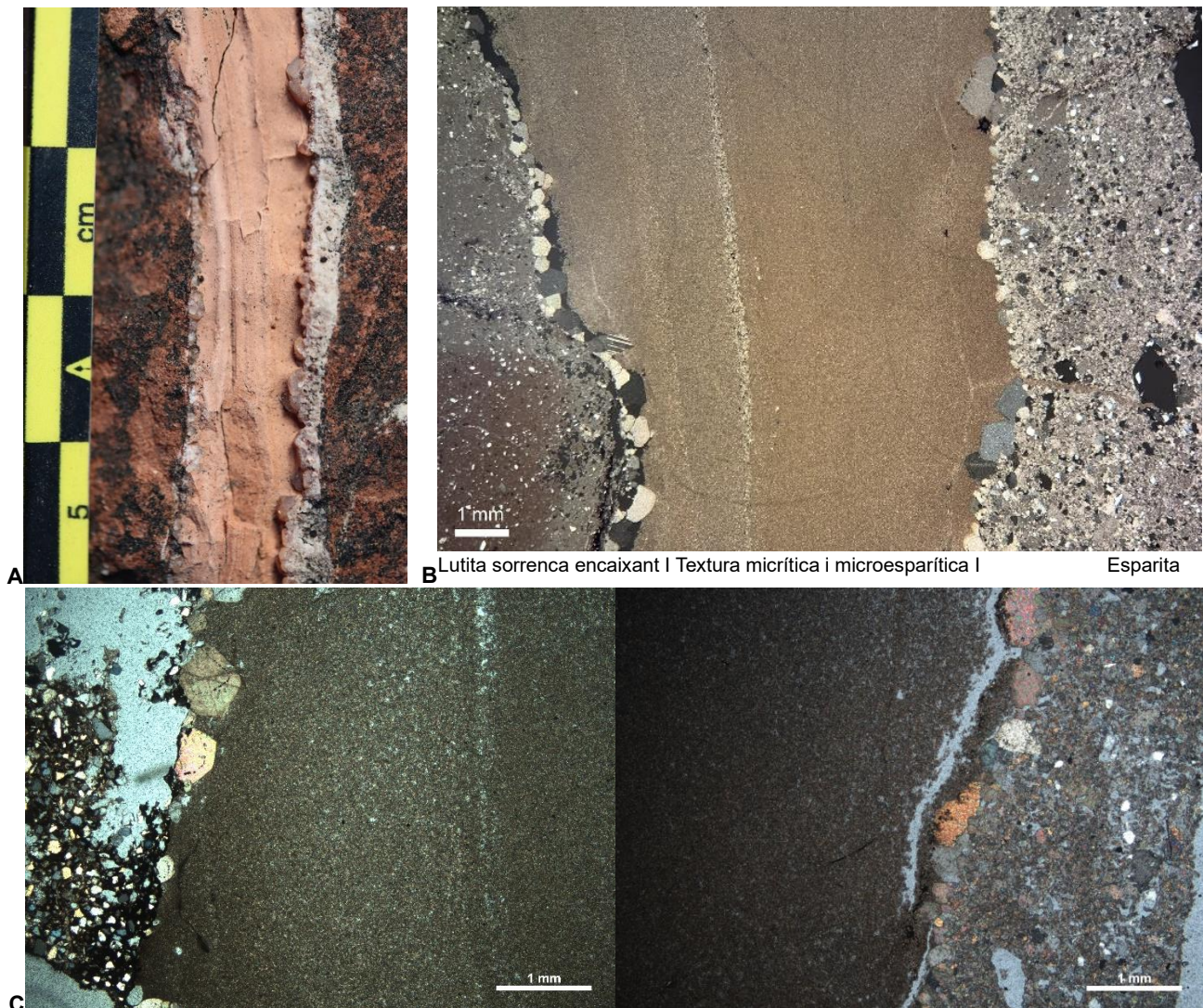


Figura 7: A Fotografia de camp subhoritzontal de la mostra V25. La zona més clara del dic, correspondria a un primer episodi d'injecció de composició carbonàtica i granulometria relativament grollera (esparita) amb cristalls euèdrics de calcita en bloc a la seva vora interna; i la zona més ataronjada del dic, correspondria a un segon episodi d'injecció, compost per sediments clàstics i granulometria més fina (textura micrítica i microesparítica). B: secció horitzontal de la mostra V25, mostrant les tres textures identificades. Nicols creuats (NC). La secció horitzontal (B) correspon a la meitat superior del dic mostrat a la fotografia de camp (A). C: Secció vertical de la mostra V25, mostrant les dues vores de la làmina. A la vora de la dreta s'observa el dic de textura micrítica i microesparítica, de color marronós, i el dic de textura esparítica, de color blanquinós, mentre que a la vora de l'esquerra només s'observa el dic de textura micrítica i esparítica fina i la lutita sorrenca encaixant. Nicols creuats (NC).

## 5. Discussió

### 5.1. Deformació regional i context estructural

L'anàlisi estructural mitjançant la projecció estereogràfica dels cabussaments de l'estratificació suggereix que la deformació enregistrada a la zona de Vacarisses és el resultat d'un escurçament principal amb direcció nord-sud, perpendicular als eixos de plegament d'orientació E-W. Aquest patró és coherent amb un basculament progressiu associat a una discordança progressiva, reflectint la interacció entre sedimentació i tectònica. Aquestes observacions coincideixen amb els patrons de deformació regional descrits per Guimerà (1994) i Anadón et al. (1985), en el context de la compressió alpina i l'evolució del marge sud-est de la conca de l'Ebre.

Els dics clàstics observats mostren una orientació predominantment N-S a NNE-SSW i una geometria subvertical que s'ajusta al model de deformació transpressiva paleògena proposat per diversos autors (Anadón et al., 1985; Guimerà, 1994; López-Blanco et al., 2000; Marcén et al., 2018). Les orientacions mesurades dels dics a Vacarisses són comparables amb la família de diàclasis subverticals NNE-SSW del massís de Montserrat, concretament a la zona oriental. Aquesta correlació s'ha vist reforçada per l'observació recent d'un dic clàstic al barranc de la Salut

(Montserrat), paral·lel al diaclasat i morfològicament idèntic als de l'àrea d'estudi. Això suggereix que els dics es van formar dins d'un sistema regional de fracturació, amb direccions d'obertura pròximes a E-W, controlades pels esforços compressius sincrònics i coherents a escala regional amb les estructures de plegament i encavalcament de direcció propera a E-W.

A més, l'orientació dels dics és plenament compatible amb el règim tectònic transpressiu proposat per Marcén et al. (2018) per a la falla del Vallès-Penedès, on es documenta una partició d'esforç entre moviments inversos i direccionals (Figura 8A). La traça dels dics coincideix amb el camp compatible del màxim esforç compressiu ( $\sigma_1$ ) inferit pels autors, situat entre la falla dextral del Llobregat i la falla senestre-inversa del Vallès-Penedès (reactivada com a falla normal al Neogen) (Figura 8B). Això suggereix que la formació i injecció dels dics clàstics hauria tingut lloc en un moment de compressió obliqua i confirma el seu valor com a indicadors de deformació sinorogènica dins d'un context tectònic regional actiu.

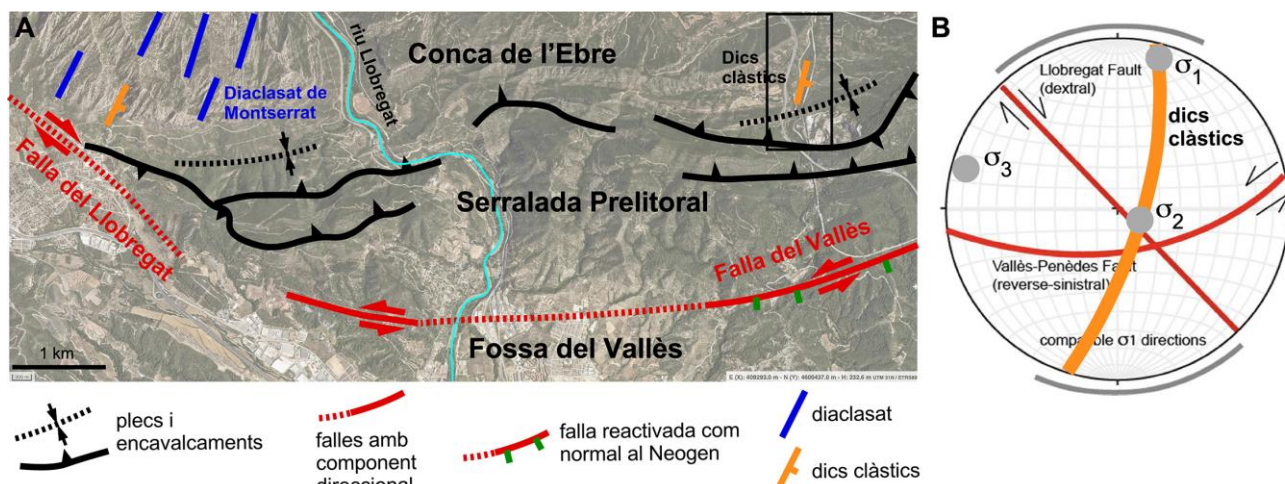


Figura 8: A: Vista aèria (Vissir-ICGC) del sector comprès entre la Salut de Montserrat i l'àrea d'estudi (requadre), amb representació esquemàtica de les estructures característiques de la zona segons mapa geològic 1:25.000, full 392-1-2 Olesa de Montserrat (ICGC, 2002) i segons aquest treball (vegeu apartat 5.1. de la discussió). B: Projectió estereogràfica del pla mitjà dels dics clàstics estudiats en aquest treball (en taronja) i dels eixos principals d'esforç deduïts ( $\sigma_1$   $\sigma_2$   $\sigma_3$ ), sobreposats a les orientacions estructurals publicades per Marcén et al. (2018) de les falles del Vallès-Penedès i del Llobregat (en vermell).

## 5.2. Evidències de deformació postdeposicional en còdols i matriu

La imbricació observada als còdols indica un transport predominant en direcció sud-nord. Les fractures intraclast presents als còdols de litologies triàsiques semblen haver-se generat posteriorment a la seva deposició, donat que s'observa certa consistència en el tipus i orientació de les fractures dins dels diferents clastos (Ramsay, 1964; Eidelman i Reches, 1992), tal com s'ha documentat més clarament a la zona de la presa del Cairat a Olesa de Montserrat (Druguet et al., 2024).

També es reconeixen contactes de pressió-dissolució entre còdols, predominants als clastos de carbonat, que podrien reflectir processos de compactació i/o deformació postdeposicionals. Aquest tipus de deformació és habitual en conglomerats afectats per compressió tectònica, especialment en presència de còdols solubles com les calcàries (Simón et al., 2013). A més, en el contacte de pressió dissolució representat a la figura 4B, la marca de pressió entre còdols grans forma un angle elevat amb la direcció del dic clàstic adjacent, la qual cosa és coherent amb una direcció de màxima compressió orientada N-S, tal com reflecteixen els patrons estructurals regionals (Guimerà, 1994).

Aquestes observacions indiquen que els contactes de pressió dissolució i les fractures intraclast en còdols poden servir com indicadors fiables de deformació posterior a la sedimentació en un context tectònic actiu.

## 5.3. Característiques i formació dels dics clàstics

Els dics clàstics podrien haver-se format a partir de fluids amb composicions variables, carbonàtiques i clàstiques, associats a processos tectònics que haurien afavorit la fluidificació del sediment i la seva injecció en fractures. Aquest mecanisme és compatible amb els processos d'injecció de sorres no consolidades en règims on la pressió del fluid supera la resistència a fractura de la roca encaixant,

generant fractures hidràuliques perpendiculars a l'esforç mínim compressiu  $\sigma_3$  (Monnier et al., 2015; Cosgrove, 2015).

L'anàlisi estructural de la projecció estereogràfica de les orientacions dels dics clàstics revela dues famílies: una principal d'orientació NNE-SSW que forma un angle elevat amb l'estratificació, i una secundària amb una orientació paral·lela als plans d'estratificació. suggereix que els estrats es pleguen per compressió nord-sud formant un sinclini. La compressió amb  $\sigma_1$  subhoritzontal N-S ha afavorit l'obertura d'esquerdes d'extensió de direcció propera a nord-sud, permetent la intrusió dels dics clàstics, els qual s'obririen en la direcció de mínim esforç compressiu regional,  $\sigma_3$ , subhoritzontal E-W. Aquesta configuració és coherent amb una formació tectònica primària, com proposen Monnier et al., (2015), sense necessitat de fractures preexistents.

La segona família de dics clàstics sembla estar condicionada per zones de debilitat estructural preexistents, com els plans d'estratificació, que haurien actuat com a guies de propagació per a fluids injectats en condicions de deformació, especialment en materials amb contrastos de competència mecànica, i que és coherent amb el que descriuen Blenkinsop, (2008) i Watkins et al., (2015).

El patró segons el qual els dics clàstics envolten còdols arrodonits, però travessen còdols allargats que formen un angle elevat amb la direcció dominant del dic suggereix un control tectònic en la seva propagació, condicionat per la resistència dels clasts i l'orientació dels esforços. Aquest comportament és coherent amb el "process zone model", que explica el desenvolupament localitzat de fractures en funció de les heterogeneïtats del medi i l'estat d'esforç (Blenkinsop, 2008).

Aquestes observacions reforcen la hipòtesi que la formació dels dics està fortament controlada per l'estat d'esforç regional i les propietats mecàniques locals.

El fet que els dics clàstics no es barregin amb la roca encaixant suggereix que la roca encaixant era cohesiva en el moment de la injecció. L'aturada dels dics clàstics en topar verticalment contra l'estratificació, observada especialment en bretxes de matriu suportada, podria indicar que certes litologies actuen com a barreres a la propagació dels dics. Aquest fet és coherent amb el control dels contrastos litològics i la permeabilitat en la propagació dels dics en escenaris d'injecció controlada per sobrepressió progressiva en cossos sorrencs descrit per Monnier et al. (2015).

#### **5.4. Interacció fluids-tectònica**

La dispersió d'orientacions de les venes dins de cada família observada en la projecció estereogràfica pot reflectir la influència de fluids hidrotermals. Quan la pressió de porus supera la resistència de la roca, es poden generar fractures amb orientacions independents del camp d'esforços tectònics regionals. Això és compatible amb el mecanisme de fractura hidràulica descrit per Monnier et al., (2015), relacionat amb la injecció de sediments clàstics i les fractures generades en conseqüència, i que és habitual en medis poc consolidats amb sobrepressió de fluids (Cui et al., 2013; Jolly i Lonergan, 2002).

La geometria de les esquerdes de tensió, com ara bifurcacions que inclouen blocs de roca entre dics, podria reflectir un canvi local en el camp d'esforços durant la injecció. Blenkinsop (2008) relaciona aquestes morfologies amb reactivacions locals i condicions mecàniques variables. A més, Jolly i Lonergan (2002) remarquen que la presència de dics clàstics de gran volum pot estar fortament condicionada per la interacció entre sobrepressió de porus i les propietats del medi, cosa coherent amb les estructures observades al present estudi.

En aquest context, la presència de barita al dic clàstic de la mostra V25 podria ser un altre indicador d'activitat hidrotermal durant l'orogènia alpina. Es podrien dur a terme anàlisis isotòpiques de sofre per confirmar un origen endogenètic (Jazi et al., 2016), la qual cosa obre noves línies futures d'investigació geoquímica.

#### **5.5. Episodis d'injecció i interpretació microestructural**

La morfologia "pseudoplegada" observada en una majoria dels dics es podria haver format per propagació a través d'una roca encaixant heterogènia combinada amb processos de compactació, en un procés compatible amb la interacció entre deformació, fluids i litologies contrastades descrita per Cosgrove (2015). Aquesta dinàmica és similar als efectes tectònics descrits per Ahmadi et al. (2019), on la reactivació de fractures preexistents, juntament amb episodis compressius i extensionals, genera estructures plegades i un augment localitzat de la densitat de fractures.

A la mateixa làmina, la V25 top, s'identifiquen dos fluids diferenciats: un de composició clàstica i un altre carbonàtic, formats en pulsacions separades. La direcció de les fractures indica que primer es va injectar un dic carbonàtic de granulometria grollera i, posteriorment, un dic clàstic de granulometria fina, associat a una apòfisi. Aquesta successió encaixa amb la naturalesa episòdica dels processos d'injecció descrita per Cosgrove (2015), així com amb els mecanismes relacionats amb fractura sísmica i sobrepressió de fluids exposats per Sach et al. (2020) i Jolly i Lonergan (2002).

La morfologia dels grans cristalls de calcita en bloc (blocky) observats a les vores entre dics, amb formes euèdriques i sense morfologia fibrosa, podria indicar que puntualment el ritme d'obertura de la vena va excedir el de creixement (Passchier & Trouw, 2005). La presència de venes de calcita dins del dic clàstic de granulometria fina suggereix un tercer episodi d'injecció, de menor magnitud i també de composició carbonàtica, que afecta el dic clàstic preexistent. Aquesta successió de venes apunta a una repetició en el temps dels processos injectius. Aquest tercer episodi d'injecció de composició carbonàtica apunta a una repetició temporal dels processos injectius, vinculada a la fracturació progressiva de zones de falla (Blenkinsop, 2008; Cosgrove, 2015).

## 5.6. Limitacions i recerca futura

Tot i la qualitat de les observacions, cal reconèixer algunes limitacions metodològiques, com l'absència d'anàlisis geoquímiques, per exemple isotòpiques d'isòtops de sofre, que impedeix confirmar l'origen hidrotermal de la barita.

Per aprofundir en els processos d'injecció i la relació amb la tectònica, és proposa: dur a terme anàlisis isotòpiques de sofre, estendre l'estudi a altres sectors de la conca de l'Ebre, comparar les injectites amb casos documentats en altres conques sinorogèniques, i desenvolupar experiments de laboratori sobre fluïdificació i fractura en medis heterogenis.

## 6. Conclusions

Aquest treball ha permès identificar i caracteritzar els dics clàstics del marge oriental de la conca de l'Ebre, i concloure que:

S'han descrit i caracteritzat detalladament els dics clàstics de les formacions Mediona, Bretxes del Cairat i La Salut, tant a nivell morfològic com microestructural i composicional. Les dades de camp i de laboratori indiquen una variabilitat significativa en la granulometria i la geometria, sovint amb múltiples fases d'injecció. Composicionalment estan formats principalment per carbonats.

L'anàlisi estructural demostra que els dics clàstics presenten una orientació preferent NNE–SSW, amb cabussaments subverticals, fet que s'interpreta com a resultat d'una injecció sincrònica amb la compressió alpina i dins un règim tectònic transpressiu. Aquesta interpretació es recolza en la comparació amb les orientacions de fractures regionals i la geometria dels plegaments.

Els trets observats als dics clàstics estudiats, com l'orientació preferent NNE–SSW, els cabussaments subverticals, la seva composició i la presència de múltiples fases d'injecció, són compatibles amb el model d'injecció activa de sorra, i més concretament amb el mecanisme d'injecció forçada, tal com defineixen Monnier et al. (2015). Aquesta interpretació és coherent amb una injecció produïda per sobrepressió progressiva en un cos sorrenc, on el fluid intersticial supera la resistència a fractura de la roca hoste, generant esquerdes hidràuliques que s'omplen de material injectat.

La presència de fractures intraclast, venes de calcita, contactes de pressió-dissolució i múltiples fases d'injecció suggereix una deformació postdeposicional i possiblement sindiagenètica, compatible amb un escenari de compactació i escurçament tectònic actiu. Aquestes estructures, conjuntament, indiquen un entorn sintectònic amb un estret control litològic i estructural sobre els processos d'injecció.

La detecció de barita ( $\text{BaSO}_4$ ) en alguns dics clàstics, especialment a la mostra V25\_taronja, suggereix condicions hidroquímiques singulars durant o després del procés d'injecció. Aquest mineral, poc habitual en ambients continentals, indica la possible participació de fluids rics en sofre i bari, possiblement relacionats amb circulació profunda. Aquesta observació posa de manifest la complexitat dels sistemes de fluids implicats i obre noves línies de recerca.

Aquest treball aporta dades noves que reforcen la interpretació dels dics clàstics com a indicadors de deformació sinorogènica, i ofereix una proposta interpretativa per a la seva evolució dins la conca

sud-oriental de l'Ebre. També enllaça amb patrons reconeguts al massís de Montserrat i la falla del Vallès-Penedès, contribuint a una millor comprensió tectonosedimentària regional.

Tot i això, la manca de datació absoluta, el nombre limitat de mostres analitzades i la dificultat d'establir seqüències temporals absolutes representen limitacions del present estudi. Seria desitjable ampliar l'abast a altres sectors del marge oriental de la conca i incorporar tècniques complementàries (geoquímiques i geocronològiques) per millorar la cronologia dels episodis d'injecció.

El treball ha assolit els objectius proposats, tot i que la relació precisa entre els episodis d'injecció i fases tectòniques concretes requeriria un estudi més detallat. En aquest sentit, el present TFG pot servir com a base per a futures investigacions, com ara un TFM enfocat a la modelització dels discs clàstics en conques sinorogèniques.

## 7. Agraïments

Vull expressar el meu agraïment als tutors del treball, Dra. Elena Druguet i Dr. Oriol Oms, pel seu suport i orientació al llarg del procés d'elaboració.

Agraeixo també al Dr. Jordi Ibáñez la seva col·laboració en l'anàlisi per difracció de raigs X de les mostres, així com les aportacions realitzades durant el treball de camp.

També agraeixo al professorat del grau en Geologia la seva predisposició a aplicar les adaptacions necessàries que han permès desenvolupar el meu itinerari acadèmic en condicions d'equitat, així com al servei PIUNE pel seu assessorament i suport al llarg dels estudis.

## 8. Bibliografia

Ahmadi, R., Mercier, E., Trigui, H., & Ouali, J. A. (2019). Relationship between fractures patterns and fold kinematics; the case study of Jebel Sehib, a typical fault-propagation fold of southern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 152, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.01.012>

Anadón, P., Cabrera, L., Guimerà, J., & Santanach, P. (1985). Paleogene strike-slip deformation and sedimentation along the southeastern margin of the Ebro Basin.

Anadón Monzón, P. (1978). El Paleógeno continental anterior a la transgresión biartziense (Eoceno medio) entre los ríos Gaia y Ripoll.

Bach, J., Anglés, M., Gual, G., & Estrada, M. R. (2010). Riera de Sant Jaume – Ribes Blaves. Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia, i Unitat d'Estratigrafia, Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona. Amb el patrocini de l'Institut Geològic de Catalunya i l'Agència Catalana de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca.

Blenkinsop, T. G. (2008). Relationships between faults, extension fractures and veins, and stress. *Journal of Structural Geology*, 30(5), 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2008.01.008>

Cosgrove, J. W. (2015). The association of folds and fractures and the link between folding, fracturing and fluid flow during the evolution of a fold–thrust belt: a brief review. <https://doi.org/10.1144/SP421.11>

Cui, M., Peng, N., Liu, Y., Wang, Z., Li, C., Xu, K., & Kuang, H. (2023). Recognizing deformation origins: a review of deformation structures and hypothesis on the perspective of sediment consolidation. *International Geology Review*, 65(9), 1500-1523. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2094840>

Dixon, R. J., Schofield, K., Anderton, R., Reynolds, A. D., Alexander, R. W. S., Williams, M. C., & Davies, K. G. (1995). Sandstone diapirism and clastic intrusion in the Tertiary submarine fans of the Bruce-Beryl Embayment, Quadrant 9, UKCS. *Geological Society, London, Special Publications*, 94(1), 77-94.

Druguet, E., Carreras, J., Oms, O. (2024). Fractured clasts in conglomerates and sedimentary breccias. Examples from the eastern margins of the Ebro basin. *Geotemas* 20, 362-363.

Eidelman, A. & Reches, Z. (1992): Fractured pebbles—A new stress indicator. *Geology*, 20, 307-310. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0307:FPANSI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0307:FPANSI>2.3.CO;2)

- Gómez-Paccard, M., López-Blanco, M., Costa, E., Garcés, M., Beamud, E., & Larrasoaña, J. C. (2012). Tectonic and climatic controls on the sequential arrangement of an alluvial fan/fan-delta complex (Montserrat, Eocene, Ebro Basin, NE Spain). *Basin Research*, 24(4), 437-455. doi: 10.1111/j.1365-2117.2011.00532.x
- Guimerà, J. (1994). Cenozoic evolution of eastern Iberia: Structural data and dynamic model. *Acta Geológica Hispánica*, 57-66.
- Hurst, A., Scott, A., & Vigorito, M. (2011). Physical characteristics of sand injectites. *Earth-Science Reviews*, 106(3-4), 215-246. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.02.004>
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2002). Mapa geològic de Catalunya 1:25.000. Full 392-1-2 Olesa de Montserrat [Mapa geològic]. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2010). Atles geològic de Catalunya. <https://www.icgc.cat/ca/Ambits-tematics/Divulgacio/Publicacions/Atles/Atles-geologic-de-Catalunya>
- Jazi, M. A., Karimpour, M. H., & Shafaroudi, A. M. (2017). Nakhlak carbonate-hosted Pb (Ag) deposit, Isfahan province, Iran: A geological, mineralogical, geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope study. *Ore Geology Reviews*, 80, 27-47. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.010>
- Jolly, R. J., & Lonergan, L. (2002). Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions. *Journal of the Geological Society*, 159(5), 605–617. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-025>
- López-Blanco, M. (2006). Stratigraphic and tectonosedimentary development of the Eocene Sant Llorenç del Munt and Montserrat fan-delta complexes (Southeast Ebro basin margin, Northeast Spain). *Contributions to Science*, 3(2), 125-148.
- López-Blanco, M., & Gómez Gras, D. (2000). Geozona 328 Estació d'Olesa - Riera de St. Jaume. Inventari d'Espais d'Interès Geològic de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques.
- López-Blanco, M., Marzo, M., Burbank, D. W., Vergés, J., Roca, E., Anadón, P., & Piña, J. (2000). Tectonic and climatic controls on the development of foreland fan deltas: Montserrat and Sant Llorenç del Munt systems (Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 138(1-4), 17-39. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00142-1)
- Marcén, M., Casas-Sainz, A. M., Román-Berdiel, T., Griera, A., Santanach, P., Pocoví, A., Gil-Imaz, A., Aldega, L., & Izquierdo-Llavall, E. (2018). Multiple movements recorded in a crustal weakness zone in NE Iberia: The Vallès-Penedès Fault revisited. *Journal of Geodynamics*, 121, 96-114. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.07.003>
- Monnier, D., Gay, A., Imbert, P., Cavailhes, T., Soliva, R., & Lopez, M. (2015). Sand injectites network as a marker of the palaeo-stress field, the structural framework and the distance to the sand source: example in the Vocontian Basin, SE France. *Journal of Structural Geology*, 79, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2015.07.001>
- Monzón, P. A., Colombo, F., Cerdà, M. E., Marzo, M., Orozco, S. R., Santanach, P., & Sugrañes, L. S. (1979). Evolución tectonoestratigráfica de los Catalánides. *Acta geológica hispánica*, 242-270.
- Murchison, R. I. (1827). On the coal-field of Brora in Sutherlandshire, and some other stratified deposits in the north of Scotland. *Transactions of the Geological Society of London*, 2(2), 293–326.
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J. (2005). *Microtectonics* (2nd ed.). Springer.
- Ramsay, D. M. (1964). Deformation of pebbles in lower Old Red Sandstone conglomerates adjacent to the Highland Boundary fault. *Geological Magazine*, 101(3), 228-248. <https://doi.org/10.1017/S0016756800049463>
- Sach, V. J., Buchner, E., & Schmieder, M. (2020). Enigmatic earthquake-generated large-scale clastic dyke in the Biberach area (SW Germany). *Sedimentary Geology*, 398, 105571. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105571>
- Simón, J. L., Gisbert, J. & Buj, Ó. (2013). Interacting lithogenesis and pressure-solution deformation in conglomerates: example from Aliaga basin (Iberian Chain). *Geogaceta* 53, 41-44.

Watkins, H., Butler, R. W., Bond, C. E., & Healy, D. (2015). Influence of structural position on fracture networks in the Torridon Group, Achnashellach fold and thrust belt, NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, 74, 64-80. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.001>

## Annexos

### Annex 1. Localització sobre fotografia aèria de les mesures de cabussament i les mostres

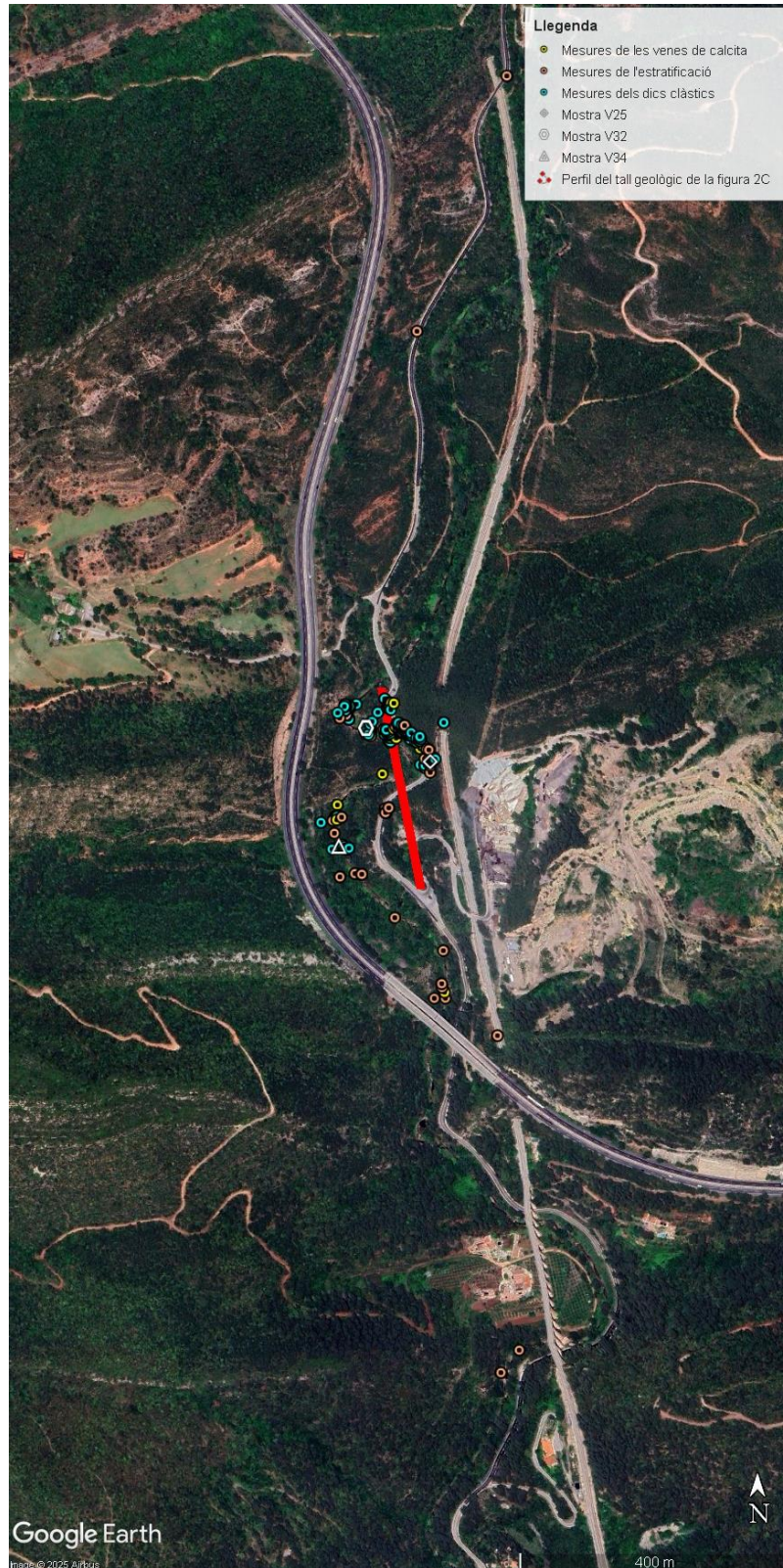
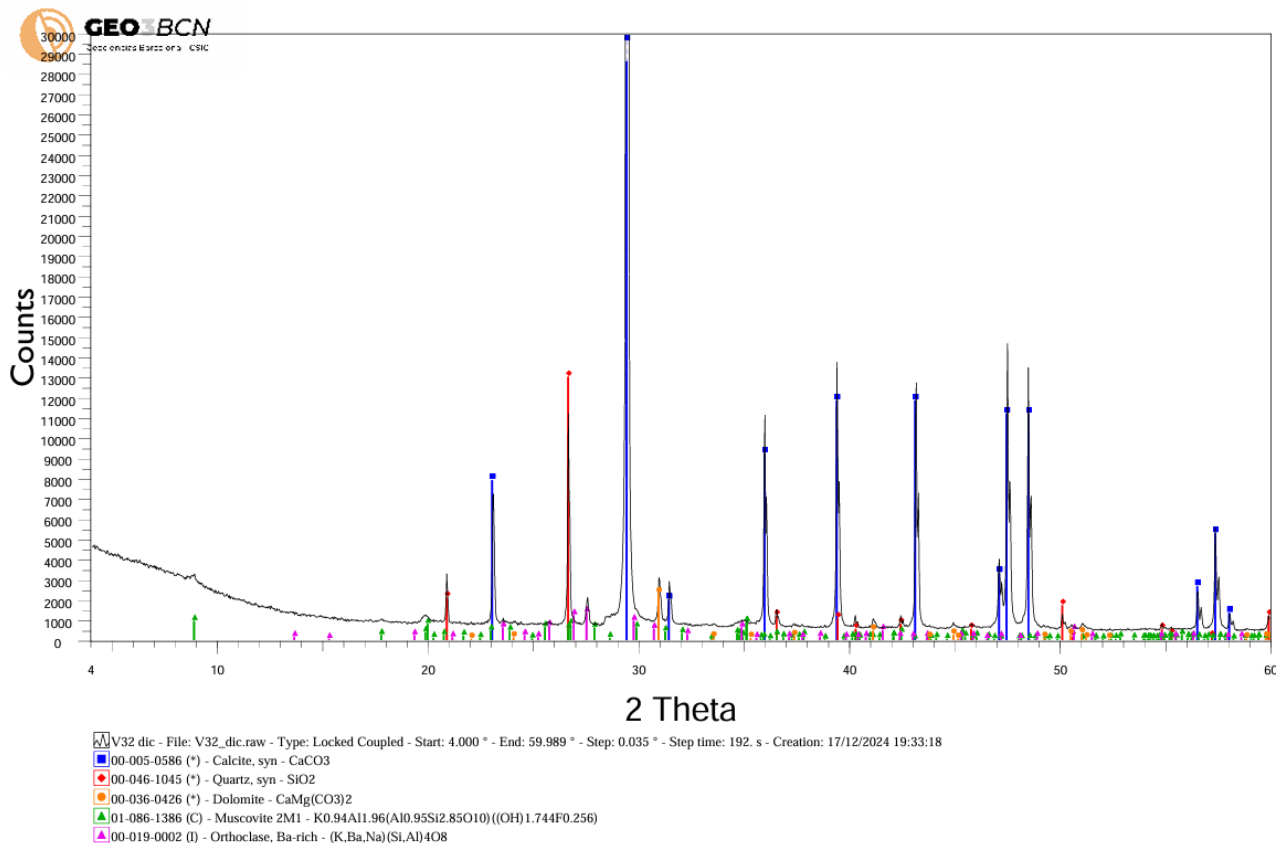
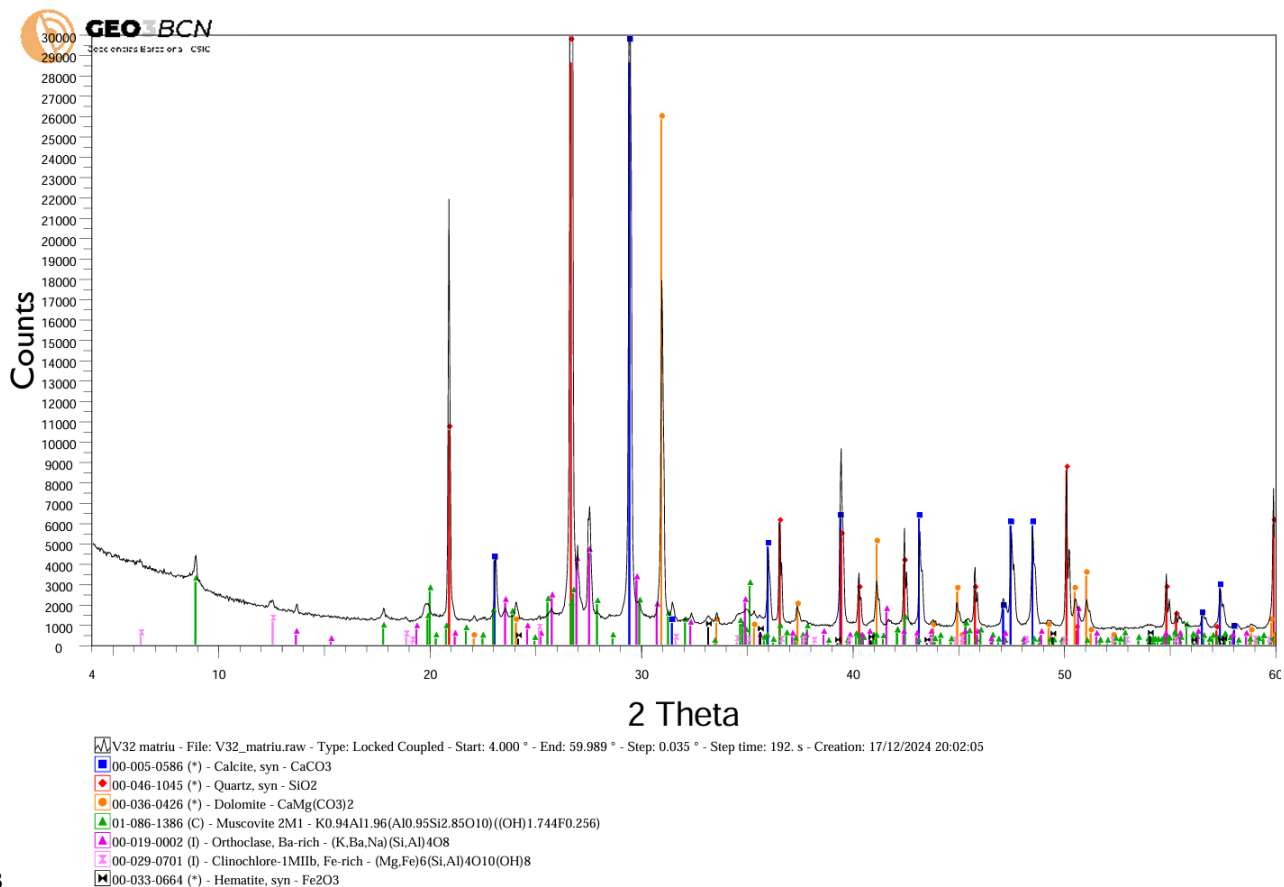


Figura A1.1: Localització sobre fotografia aèria (Google Earth) de les mesures de cabussament de l'estratificació (rosa), dels dics clàstics (blau) i de les venes de calcita (groc). També s'indiquen les ubicacions on s'han agafat les mostres V25 (rombe), V32 (hexàgon), i V34 (triangle). La línia vermella correspon al perfil del tall geològic de la figura 2C.

## Annex 2: Resultats de les difraccions de raig X

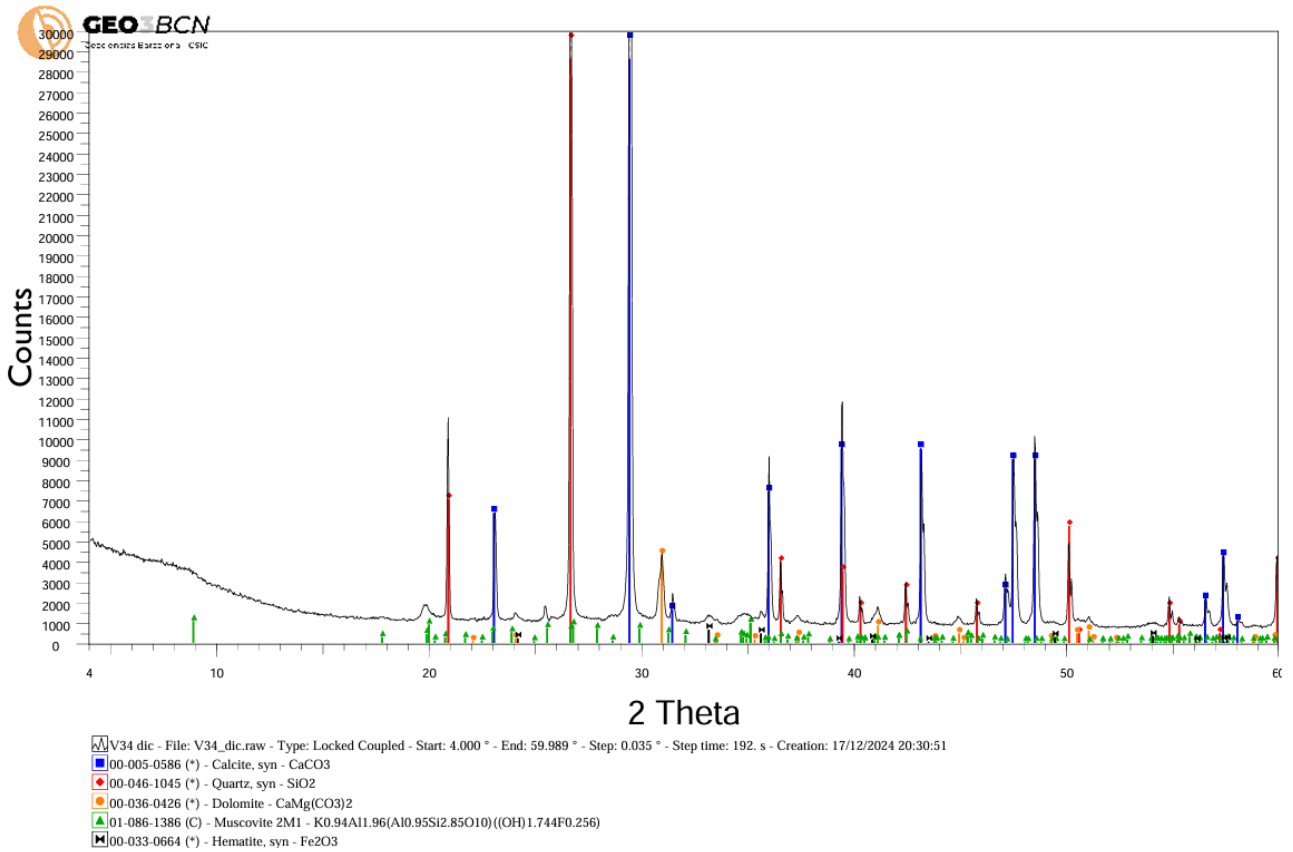


A

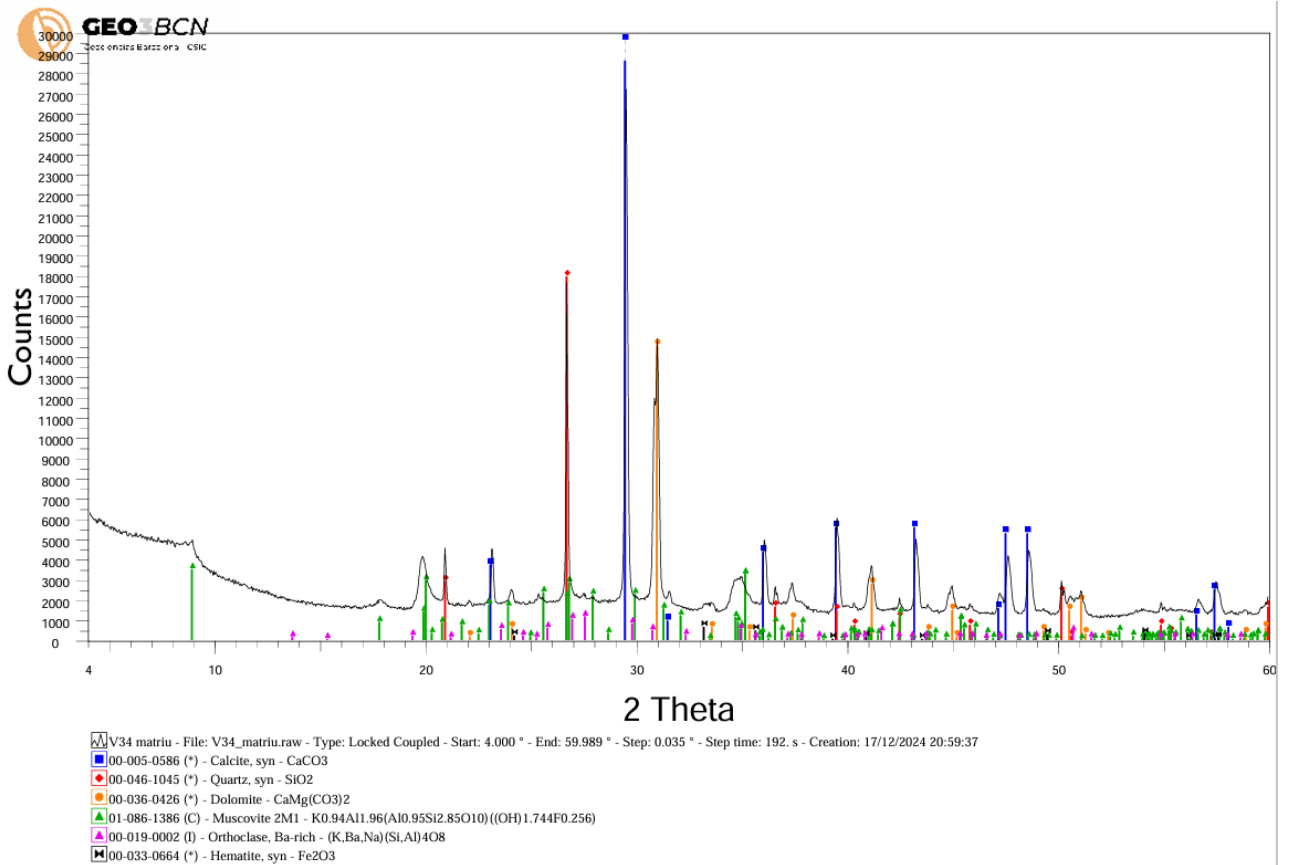


B

Figura A2.1: A: Difracció de raig X del dic de la mostra V32. B: Difracció de raig X de la roca encaixant de la mostra V32.

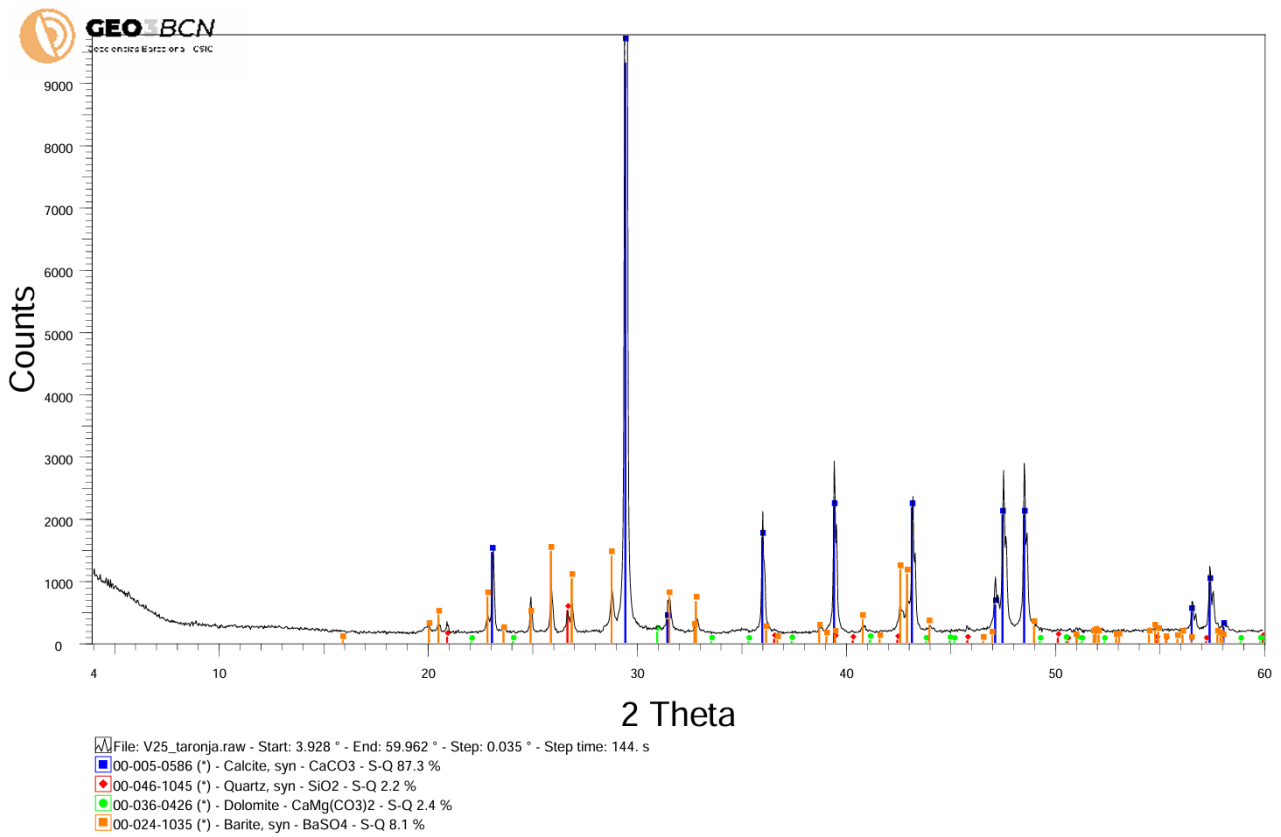


A

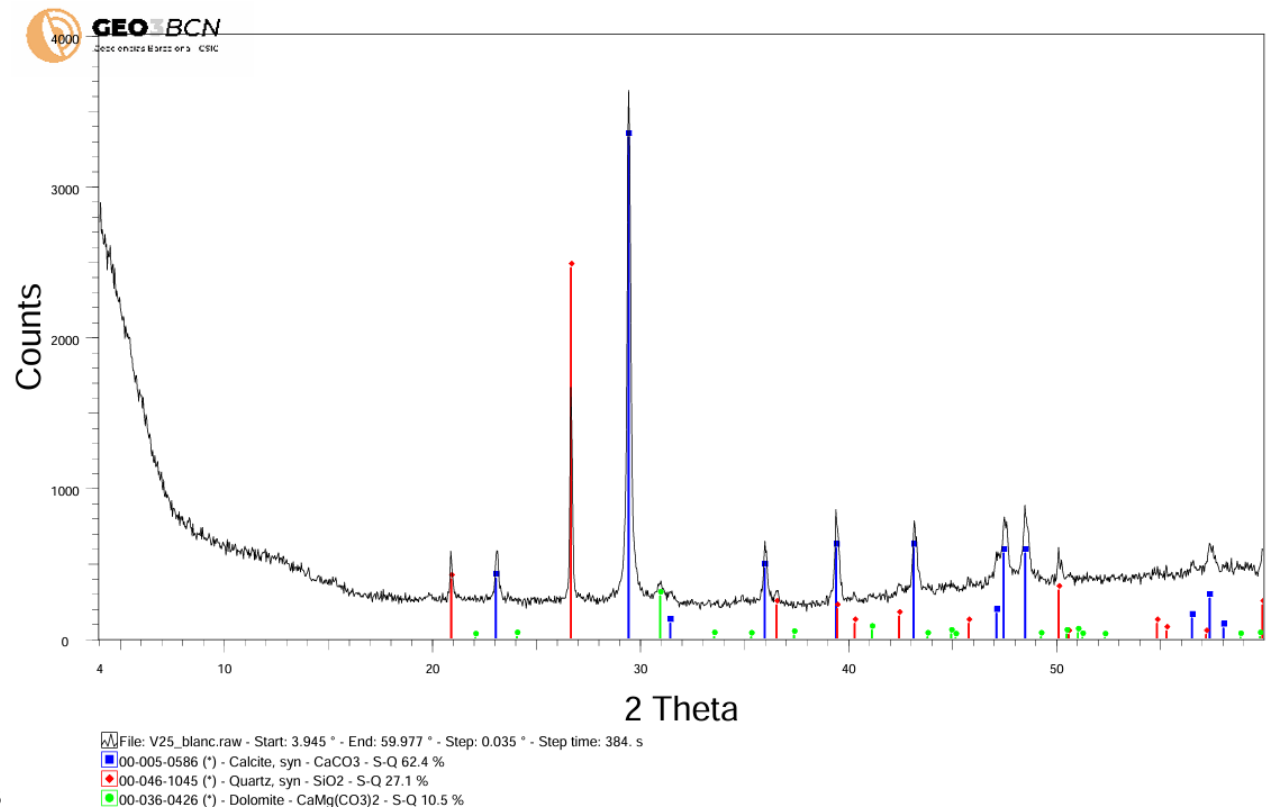


B

Figura A2.2: A: Difracció de raig X del dic de la mostra V34. B: Difracció de raig X de la roca encaixant de la mostra V34.



**A**



**B**

Figura A2.3: A: Difracció de raig X de la mostra V25\_taronja, amb presència de barita (BaSO<sub>4</sub>). B: Difracció de raig X de la mostra V25\_blanc, sense presència de barita (BaSO<sub>4</sub>).

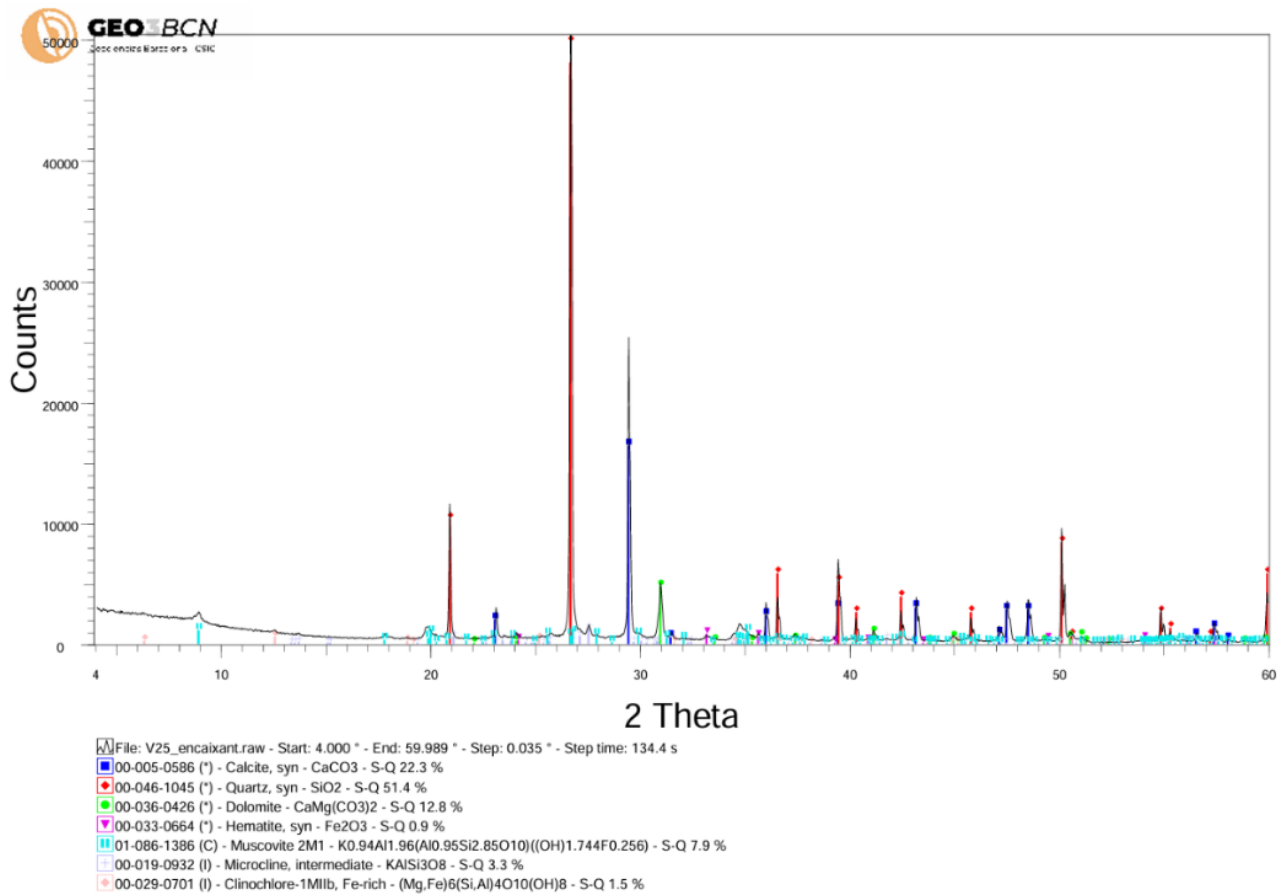


Figura A2.4: Difracció de raig X de la mostra V25\_encaixant, sense presència de barita (BaSO<sub>4</sub>).