

Caracterització de les fonts naturals de la província de Barcelona

Novembre de 2025

Exp 2025-37442



**Diputació
Barcelona**

**Àrea d'Acció Climàtica
i Transició Energètica**

Caracterització de les fonts naturals de la província de Barcelona

Per:



**Diputació
Barcelona**

**IDAEA-CSIC
Patricia Sigoña León
Sonia Valdivielso Mijangos
Enric Vázquez-Suñé**

Novembre de 2025

Índex

1	Introducció.....	4
2	Objectius	5
3	Antecedents.....	6
3.1	Característiques geogràfiques i climàtiques.....	6
3.2	Context hidrogeològic	8
3.2.1	Masses d'aigua en bon estat químic.....	9
3.2.2	Masses d'aigua en mal estat químic	10
3.2.3	Paràmetres avaluats.....	11
4	Metodologia	12
4.1	Recull de paràmetres fisicoquímics	12
4.2	Recopilació de càbals	12
4.3	Tractament de dades.....	12
5	Resultats.....	16
5.1	Paràmetres Fisicoquímics	16
5.1.1	Temperatura	17
5.1.2	pH.....	21
5.1.3	Conductivitat Elèctrica	25
5.2	Caracterització Hidroquímica	29
5.2.2	Canvis de Fàcies	36
5.3	Evolució de cabals	40
5.4	Anàlisi de pressions antròpiques	48
5.4.1	Hidrogeologia i pressions antròpiques	51
5.4.2	Correspondència amb l'estat de qualitat de masses d'aigua subterrània (ACA)	53
6	Proposta d'anàlisis complementàries : Isòtops de Deuteri ($\delta^2\text{H}$) i Oxigen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) a Fonts de la Província de Barcelona	67
6.1	Fonaments Tècnics	69
6.2	Disseny Optimitzat de Mostreig.....	69
6.2.1	Limitacions del Mostreig Total (2023)	69
6.2.2	Estratègia de Mostreig específic (90-110 mostres)	69
6.2.3	Disseny Final Proposta: 100 Mostres.....	71

6.3	Protocol de Mostreig i Anàlisi	72
6.4	Justificació dels Punts Específics (10 Mostres anomalies)	73
6.4.1	Zona Carstificada (Capçalera Llobregat i Cardener)).....	73
6.4.2	Aqüífer Al·luvial Contaminat (Vallès, Baix Llobregat)	73
6.4.3	Sistema Estable Baix Sequera (Baixa Permeabilitat Metamòrfica)	73
6.4.4	Anomalia d'Augment a la Sequera (Detrític Granular)	74
6.4.5	Validació de Evaporites Naturals (MAS05)	74
6.5	Productes Lliurables	74
7	Proposta d'accions de difusió dels resultats obtinguts.....	74
8	Conclusions	76
9	Referències	80
10	ANNEX I.....	81

1 Introducció

Les fonts naturals constitueixen un patrimoni ambiental, cultural i històric de gran valor a la província de Barcelona. Més enllà de la seva importància social i paisatgística, aquestes fonts representen punts de descàrrega directa dels aqüífers i, per tant, actuen com a indicadors sensibles de l'estat de les masses d'aigua subterrània. En un context de creixent pressió sobre els recursos hídrics, on el canvi climàtic i les activitats antròpiques (captacions, usos agrícoles, urbans i industrials) afecten tant la quantitat com la qualitat de l'aigua disponible, resulta fonamental disposar d'informació actualitzada i fiable sobre l'estat d'aquests recursos.

Des del 2016, l'Oficina Tècnica de la Diputació de Barcelona disposa de dades de paràmetres fisicoquímics, hidroquímica i cabals de les fonts de la província, cosa que proporciona una base de dades valuosa per a l'anàlisi integral d'aquests sistemes. Tanmateix, cal analitzar de manera integrada tota aquesta informació per obtenir una visió global de la situació de les fonts, comprendre els processos hidrogeològics subjacents, detectar la variabilitat espacial i temporal en la qualitat de l'aigua, identificar tendències i avaluar l'estat i la sostenibilitat de les fonts com a recurs hídric i ambiental.

En aquest context, el present estudi té com a objectiu caracteritzar les fonts d'aigua de la província de Barcelona des d'una perspectiva hidrogeològica, hidroquímica i de qualitat de l'aigua, avaluant-ne la distribució espacial i temporal, així com els potencials impactes ambientals. L'anàlisi se centra en les fonts mostrejades distribuïdes per tota la província (Figura 1), amb la finalitat de proporcionar eines per a la conservació i la gestió sostenible d'aquests recursos hídrics, així com oferir suport tècnic als ajuntaments de la província mitjançant l'anàlisi integral d'aquesta informació.

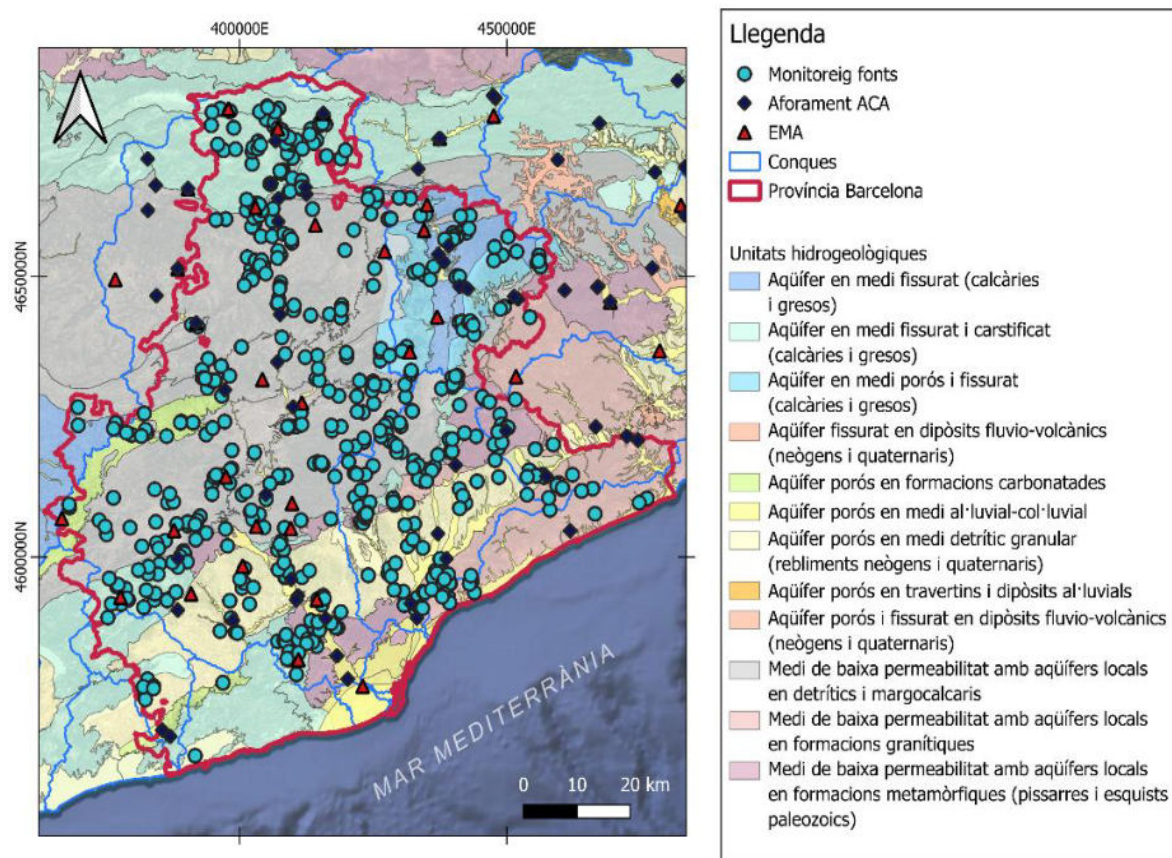


Figura 1. Localització de l'àrea de estudi. EMA: Estació Meteorològica Automàtica.

2 Objectius

L'objectiu general d'aquest treball és integrar i avaluar les característiques hidrogeològiques, hidroquímiques i de qualitat de les fonts d'aigua de la província de Barcelona, considerant-ne la distribució espai-temporal i els potencials impactes ambientals.

Els objectius específics són:

1. Recollir la informació dels paràmetres fisicoquímics, hidroquímica i cabals de les fonts de la província de Barcelona.
2. Fer un estudi de la distribució espacial i temporal de les dades de les fonts en funció dels aspectes hidrogeològics específics, la ubicació i la climatologia.
3. Determinar les característiques hidroquímiques i l'estat general de la qualitat de les aigües.
4. Determinar la distribució espacial dels paràmetres en relació amb les característiques de les masses d'aigua oficials de l'ACA on es troben.

5. Determinar els possibles impactes potencials (en quant a quantitat i qualitat) que poden patir les fonts mostrejades.
6. Fer una proposta d'anàlisis complementàries, com ara isòtops de l'aigua ($\delta^{18}\text{O}$ i δD) o altres paràmetres d'interès, tant a nivell general com puntual, amb justificació i utilitat.
7. Una proposta d'accions de difusió dels resultats obtinguts.

Amb tot això, s'espera contribuir a la gestió òptima i sostenible dels recursos hídrics a curt i llarg termini.

3 Antecedents

La província de Barcelona se situa al nord-est de la península Ibèrica, en particular a Catalunya, i limita a l'est amb la mar Mediterrània. El seu territori abasta diverses comarques, entre les quals el Barcelonès, el Vallès Oriental, el Vallès Occidental, el Baix Llobregat, l'Alt Penedès, el Garraf, el Maresme, Osona, el Berguedà, el Bages i l'Anoia, entre d'altres.

3.1 Característiques geogràfiques i climàtiques

El territori presenta una notable diversitat topogràfica, amb relleus muntanyosos de nord a sud (Pirineus, Prepirineus, Serralada Prelitoral i Serralada Litoral) i zones més planes cap a la costa mediterrània i entre els cordons muntanyosos (Figura 2). Aquesta configuració geogràfica condiona tant el clima com els recursos hídrics de la regió.

Pel que fa al règim de precipitacions, les dades històriques mostren una variabilitat interanual significativa. La sèrie temporal de precipitacions mitjanes anuals a Catalunya presenta valors que oscil·len entre aproximadament 400 mm en els anys més secs i més de 1000 mm en els anys més plujosos. La mitjana històrica se situa al voltant dels 650 mm anuals, evidenciant l'alternança entre períodes de sequera i anys de precipitacions abundants, característica del clima mediterrani (Figura 3).

Des del 2016, Catalunya ha experimentat una tendència creixent cap a condicions més seques i càlides, que van culminar en la intensa sequera de 2021 a 2023 (Figura 3). Segons l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET), aquest període es va caracteritzar per precipitacions excepcionalment baixes, situant especialment l'any 2023 com el més sec de tota la sèrie històrica des de 1920. A aquest dèficit pluviomètric se li van sumar temperatures persistentment elevades, amb anomalies superiors a 2 °C en diversos mesos, cosa que va incrementar l'evaporació i va agreujar l'estrès hídric. Entre 2020 i 2023, prop de dos terços dels mesos van registrar precipitacions per sota del normal, destacant unes tardors molt seques i uns estius extremadament càlids. A més, es van produir llargs períodes sense pluja significativa, com els 106 dies consecutius de l'hivern 2021-2022 o els 63 dies de la primavera de 2023, juntament amb una reducció notable de dies de pluja intensa que en anys anteriors ajudaven a recuperar part del dèficit. Les conseqüències van incloure la declaració d'emergència per sequera i una pressió creixent sobre els recursos hídrics, especialment en zones densament poblades.

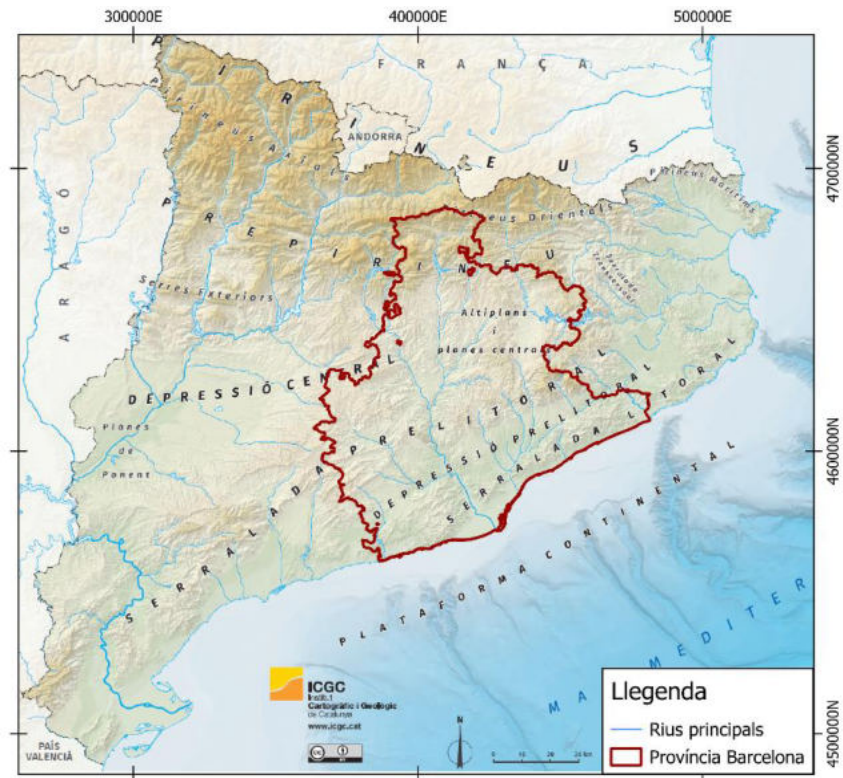


Figura 2: Unitats morfoestructurals de Catalunya. Modificat de l'ICGC.

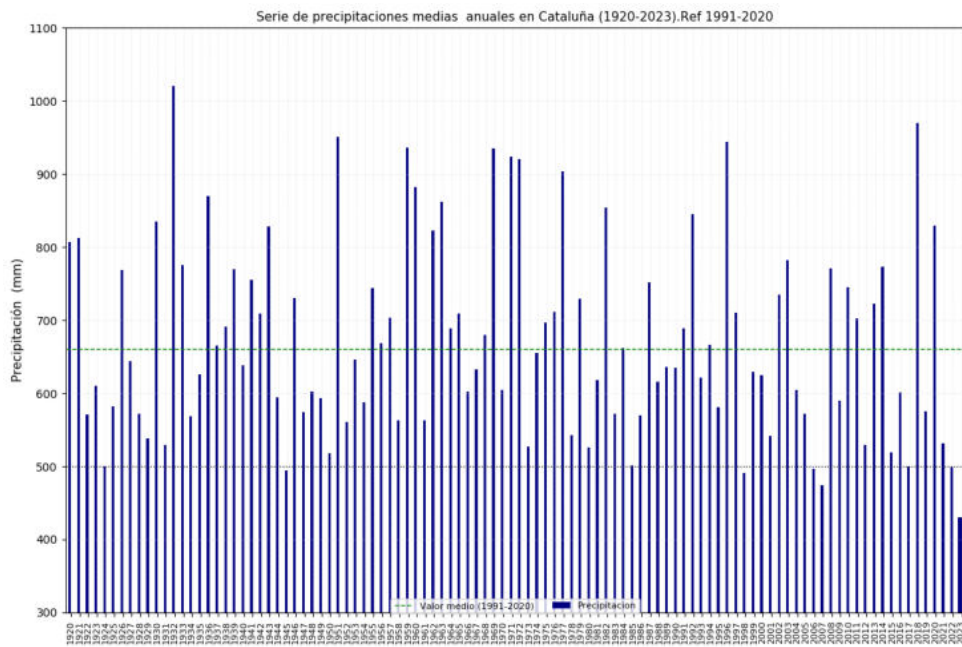


Figura 3: Sèrie de precipitacions anuals de Catalunya (1920 -2023). (Téllez et al., 2024).

3.2 Context hidrogeològic

La província presenta una gran heterogeneïtat hidrogeològica amb diferents tipus d'aqüífers. S'identifiquen unitats que inclouen aquífers en medis fissurats (calcaris i granítics), medis porosos (al·luvials, detrítics, fluvio-volcànics), així com zones de baixa permeabilitat amb aquífers locals (Figura 4). Aquesta diversitat geològica determina la disponibilitat i la gestió dels recursos hídrics subterranis al territori.

Una part significativa del territori està constituïda per formacions carbonatades que formen aquífers d'elevat interès. Es distingeixen aquífers en medi fissurat i carstificat (calcàries i gresos), que presenten permeabilitats variables segons el grau de fracturació i desenvolupament càrstic. Aquests aquífers solen mostrar bones productivitats i constitueixen recursos hídrics importants, especialment a les zones muntanyoses del nord i de l'oest provincial.

Les conques fluvials principals, com les del Llobregat, Besòs i Ter, presenten aquífers porosos en dipòsits al·luvials i col·luvials. Aquests aquífers granulars, formats per graves, sorres i llims, es caracteritzen per la seva alta permeabilitat i facilitat d'explotació. Els aquífers al·luvials de les principals valls han estat històricament molt explotats per a subministrament urbà i industrial, especialment al entorn de l'àrea metropolitana de Barcelona.

D'altra banda, en determinades zones de la província es localitzen aquífers associats a dipòsits fluvio-volcànics neògens i quaternaris. Aquests presenten característiques hidrogeològiques particulars, amb permeabilitats heterogènies condicionades per la naturalesa dels materials volcànics i la seva alternança amb sediments detrítics.

A més, es reconeixen àmplies àrees del territori, especialment les constituïdes per materials metamòrfics (esquistos i pissarres paleozoics) i granítics, amb baixa permeabilitat primària. En aquestes zones, els aquífers locals es desenvolupen únicament en zones de fracturació o alteració superficial, amb rendiments generalment limitats. Aquestes formacions actuen freqüentment com a barreres hidrogeològiques que condicionen el flux subterrani regional.

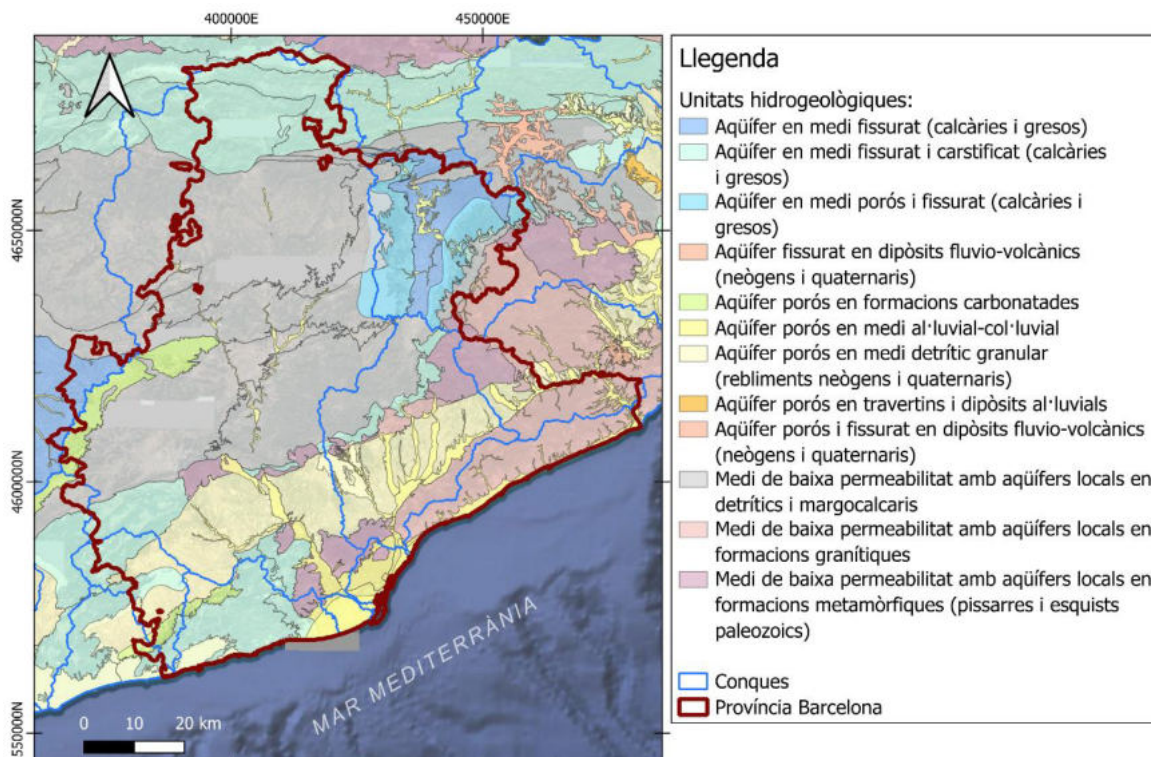


Figura 4: Distribució de les Unitats Hidrogeològiques a escala 1:50.000 a la província de Barcelona (ICGC, 2012).

3.3 Estat de la qualitat química de les Masses d'Aigua (ACA)

Segons la classificació oficial de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) corresponent a l'any 2021, la província de Barcelona compta amb 24 masses d'aigua subterrània (Figura 5), de les quals 10 es troben en bon estat de qualitat química i 14 en mal estat de qualitat química, representant el 43,5 % i el 56,5 % del total, respectivament.

3.2.1 Masses d'aigua en bon estat químic

Les masses classificades com a "Bo" (verd al mapa) es distribueixen principalment a les zones muntanyoses del nord i centre de la província:

1. MAS01, MAS05 (zona nord)
2. MAS13, MAS66, MAS69, MAS70 (zona central)
3. MAS20, MAS35, MAS37, MAS68 (sud-costanera)

Aquestes masses presenten característiques hidrogeològiques que afavoreixen la preservació de la qualitat natural de l'aigua, incloent-hi menor pressió antròpica, ubicació en zones de capçalera, predomini d'àrees forestals i aqüífers amb menor vulnerabilitat a la contaminació superficial (ACA, 2021).

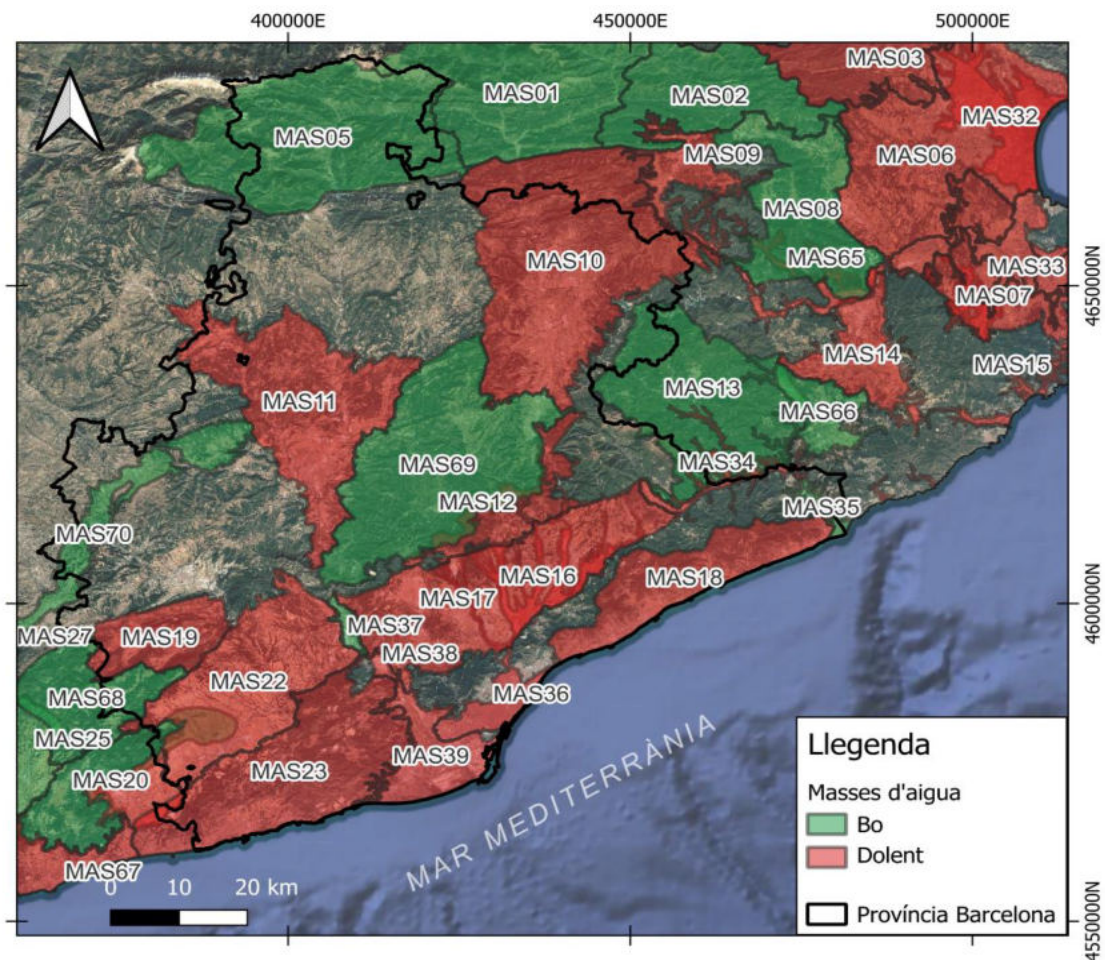


Figura 5: Masses d'Aigua de la província de Barcelona i la classificació química segons l'ACA (2021).

3.2.2 Masses d'aigua en mal estat químic

Les masses classificades com a “Dolent” (vermell al mapa) mostren una distribució més extensa, ocupant principalment la zona central, el sud i la costa de la província, coincidint amb àrees de major densitat de població i activitat agrícola intensiva:

1. La franja central de la província (MAS10, MAS11, MAS12, MAS16, MAS17, MAS19, MAS22, MAS34, MAS38)
2. Zones costaneres i periurbanes (MAS18, MAS21, MAS23, MAS36, MAS39)

El mal estat químic d'aquestes masses està associat principalment a pressions antròpiques derivades d'activitats agrícoles intensives (fertilització, purins), urbanització i industrialització, i contaminació històrica acumulada en aqüífers amb temps de residència prolongats (ACA, 2021).

3.2.3 Paràmetres avaluats

L'avaluació de l'estat químic de les masses d'aigua es basa en l'anàlisi de 18 paràmetres, dels quals 12 són analitzats per la Diputació de Barcelona en la seva xarxa de monitoratge de fonts. Els paràmetres considerats són:

1. Elements traça: Arsènic (As), Bor (B), Cadmi (Cd), Crom (Cr), Plom (Pb)
2. Ions majors: Clorur (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-})
3. Nutrients i compostos nitrogenats: Amoni (NH_4^+), Nitrit (NO_2^-), Nitrat (NO_3^-), Fosfat (PO_4^{3-})
4. Altres paràmetres: Conductivitat elèctrica (C.E)

Aquesta avaluació oficial proporciona el marc de referència per a l'anàlisi de l'estat de les fonts monitorades per la Diputació, permetent identificar la coherència entre les surgències puntuals i l'estat general de la massa d'aigua a la qual pertanyen, així com detectar possibles senyals d'alerta primerenca en zones amb deteriorament localitzat.

4 Metodologia

4.1 Recull de paràmetres fisicoquímics

Les dades històriques de paràmetres fisicoquímics (Cabal (L/s), Temperatura (°C), Nitrat (mg/L), Conductivitat ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Amoni (mg/L), Terbolesa (UNF), E. coli (NMP/100 ml), Enterococ (NMP/100 ml), *Clostridium perfringens* (NMP/100 ml), Bacteris coliforms (UNF/100 ml), Bacteris aerobis (NMP/100 ml), Sulfat ($\mu\text{g}/\text{L}$), Clorur (mg/L), Fluorur (mg/L), Oxidabilitat (mg/L), Cianur ($\mu\text{g}/\text{L}$), Alumini ($\mu\text{g}/\text{L}$), Ferro ($\mu\text{g}/\text{L}$), Manganès ($\mu\text{g}/\text{L}$), Sodi (mg/L), Antimoni ($\mu\text{g}/\text{L}$), Arsènic ($\mu\text{g}/\text{L}$), Bor (mg/L), Cadmi ($\mu\text{g}/\text{L}$), Coure (mg/L), Crom ($\mu\text{g}/\text{L}$), Mercuri ($\mu\text{g}/\text{L}$), Níquel ($\mu\text{g}/\text{L}$), Plom ($\mu\text{g}/\text{L}$), Seleni ($\mu\text{g}/\text{L}$), Fosfat (mg/L), Nitrit (mg/L), Potassi (mg/L), Calci (mg/L), Zinc ($\mu\text{g}/\text{L}$), Magnesi (mg/L), Duresa total (mg/L), pH, Alcalinitat (mg/L)) del període 2016 - 2024 de les fonts de Barcelona van ser obtingudes de la base de dades de la Diputació de Barcelona (<https://gisportal.diba.cat/sitac/fonts>)

4.2 Recopilació de càbals

Les dades històriques de cabals (2016 – 2024) van ser obtingudes de la plataforma interactiva del Sistema de Difusió de la Informació del Medi (SDIM), operada per l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), per a 44 estacions d'aforament a la província de Barcelona.

4.3 Tractament de dades

Per a la caracterització hidroquímica de la zona d'estudi, es van prendre els resultats de laboratori de les mostres recollides durant la campanya 2023 i 2024 per la Diputació de Barcelona, ja que són les úniques que disposen de l'anàlisi completa d'ions majoritaris. A partir d'aquests resultats de laboratori es va realitzar el següent processament.

Per al càlcul de la concentració (mg/L) de bicarbonat i carbonat, es van prendre les dades de pH i d'alcalinitat (mg/L de CaCO_3), segons l'equilibri carbonat–bicarbonat–carboni dissolt i de com cada espècie aporta alcalinitat en funció del pH.

La caracterització hidroquímica es va realitzar construint els diagrames de Piper mitjançant l'eina EasyQuim, versió 2015, i el programa AkvaGis.

L'anàlisi estadístic dels paràmetres fisicoquímics in situ més el nitrat es va realitzar amb Python (McKinney, 2010).

La distribució espacial de les característiques fisicoquímiques, químiques i de cabal, integrades en la hidrogeologia, es va realitzar mitjançant QGIS.

Per a l'anàlisi de tendències en els cabals de les fonts s'han aplicat els mètodes no paramètrics Mann–Kendall (MK) i Theil–Sen (pendent de Sen), àmpliament recomanats a la literatura hidrològica per a sèries temporals ambientals (Helsel i Hirsch, 2002). Aquestes tècniques no requereixen assumir normalitat, són robustes davant valors atípics i permeten avaluar tendències monòtones fins i tot en sèries curtes, incompletes o amb alta variabilitat interanual, com és habitual en registres de fonts afectades per la climatologia mediterrània. El test de Mann–Kendall proporciona la direcció i significació estadística de la tendència, mentre

que la pendent de Sen quantifica la magnitud del canvi anual de manera robusta davant pics anòmals (per exemple, valors màxims registrats el 2020). Ambdues metodologies són estàndards en hidrologia (Hamed & Rao, 1998; Burn i Hag Elnur, 2002; Helsel i Hirsch, 2002) i es consideren més adequades que la regressió lineal clàssica per a aquest tipus de dades. Per definir els rangs de descens/ascens en els cabals, es van classificar tendències qualitatives segons el rang de valors aforats a les fonts, tal com es mostra a la Taula 1.

Taula 1: Rangs de variació de cabal històric de les fonts estudiades i la seva classificació.

ΔQ (L/s)	Classificació
< -0.05	Descens fort
-0.05 a -0.01	Descens moderat
-0.01 a +0.01	Estable
+0.01 a +0.05	Ascens moderat
> +0.05	Ascens fort

L'anàlisi de pressions antròpiques es va realitzar mitjançant la comparació entre la ubicació de les fonts, la climatologia, la geologia i les pressions antròpiques, integrant un mapa d'explotacions agrícoles i ramaderes obtingut de la base de dades de la Generalitat de Catalunya i la ubicació de les pressions antròpiques de la base de dades de l'ACA. A més, es van considerar dins d'aquest anàlisi aquelles mostres amb un error del balanç iònic dins del rang $\pm 15\%$. Així, per determinar la possible influència antròpica sobre les fonts de la província, es va seguir l'esquema de treball de la Figura 6.

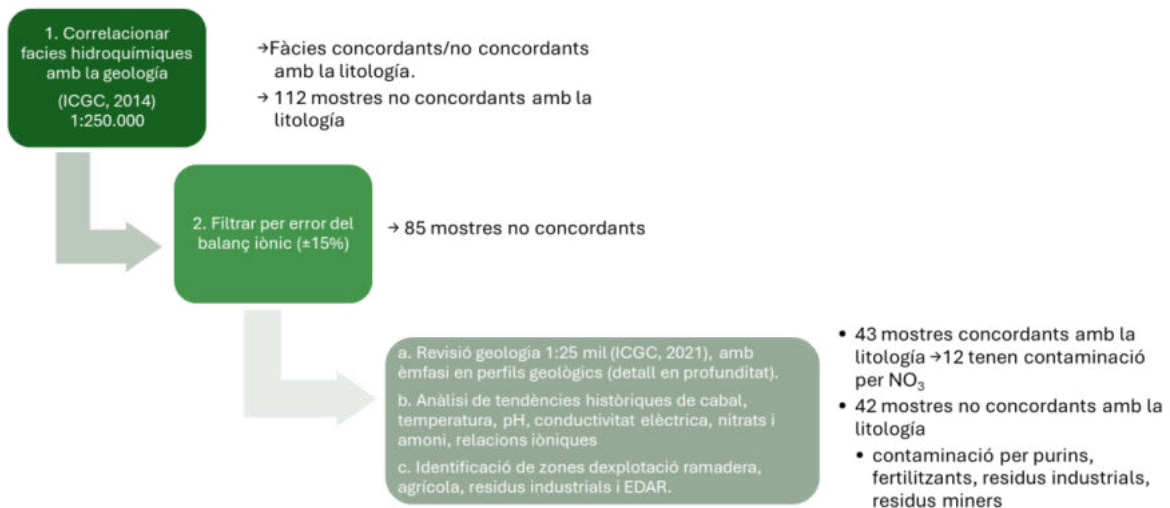


Figura 6: Esquema de treball d'anàlisi i d'interpretació hidroquímica.

En aquest informe es mostren els mapes de distribució espacial de diferents paràmetres fisicoquímics i elements d'aigües recollides durant els anys 2023 i 2024, per tenir l'analítica més completa. A més, dins dels mapes d'aquest informe es consideraran els paràmetres exposats a la Taula 2, segons els indicadors de qualitat química de l'aigua (ACA) i els objectius d'aquest estudi, per als anys 2023 i 2024. La resta de mapes s'adjunten a l'Annex I.

Taula 2: Llistat de paràmetres monitoritzats per la Diputació de Barcelona i avaluats per l'ACA.

Llistat de paràmetres	Anys amb dades
Arsènic (As)	2018
Bor (B)	2018, 2023, 2024
Cadmi (Cd)	2018, 2023, 2024
Conductivitat elèctrica (C.E)	2016 al 2024
Clorur (Cl ⁻)	2018, 2023, 2024
Crom (Cr)	2018, 2023, 2024
Amoni (NH ₄ ⁺)	2016 al 2024
Nitrit (NO ₂ ⁻)	2023, 2024
Nitrat (NO ₃ ⁻)	2016 al 2024
Plom (Pb)	2018, 2023, 2024
Fosfat (PO ₄ ⁻²)	2023, 2024
Sulfat (SO ₄ ⁻²)	2018, 2019, 2023, 2024
Facies hidroquímica	2023, 2024

Per a l'anàlisi de distribució espacial dels paràmetres en relació amb les característiques de les masses d'aigua de l'ACA, es van utilitzar els valors de referència del tercer cicle del Pla de Gestió Hídrica (2023-2027), llistats a la Taula 3. Els llindars de NO₃, NO₂ i NH₄ s'assumeixen idèntics per a cada massa d'aigua (37,5 mg/L, 0,5 mg/L i 0,5 mg/L, respectivament). Cal assenyalar que els resultats històrics dels anàlisis de laboratori de les mostres estudiades indiquen que les concentracions de Cd, Cr i Pb mai no excedeixen el límit de detecció de l'equip i, per tant, per a aquests ions no es realitzarà l'anàlisi comparativa amb la qualitat de les masses d'aigua de l'ACA.

Taula 3: Llandars de referència dels paràmetres avaluats per l'ACA per classificar la qualitat química de les masses d'aigua.

Massa d'aigua	As (µg/L)	B (µg/L)	Cd (µg/L)	Cl (mg/L)	Conductivitat (µS/cm)	Cr (µg/L)	Pb (µg/L)	SO4 (mg/L)
MA01	47.8	25	0.3	6.3	485	2.5	5	55.5
MA05	2	25	0.4	19.4	794.4	2.5	5	256
MA13	2	25	0.3	40.2	482	2	7.9	35.9
MA66	30	250	2.5	110.1	536	2.5	5	68
MA69	2.8		2.5	166.4	1421.5	3.6	6.2	381
MA70	4		0.3	174.1	2109.4	0.5	1	705.6
MA20	2.5	64.3	2.5	125.6	958.2	2.5	5	241.5
MA35	2.5	87	0.6	190.2	1522	2	5	127.4
MA37	5	250	2.5	393.1	2225	11	5	248
MA68	2.5	25	2.5	24.5	801	2.5	5	197
MA10	2.5	58.6	2.5	110.5	1496.5	2.5	5	240.4
MA11	4	147.6	1.8	439.6	2453.8	2.5	5	778.2
MA12	2.5	90.2	2.5	117.8	1544.4	2.5	5.8	579.4
MA16	4.7	230.9	2.5	256.6	1586.2	4.6	5	157.1
MA17	3.4	156.2	2.5	268.3	1684.6	15	5	257.8
MA19	2.5	84.2	2.5	24	1153.2	2.5	5	478.6
MA22	5	890.2	2.5	355.5	2203.9	14	5	476.8
MA34	7.3	89.1	2.5	116.3	816.9	2.5	6	88.7
MA38	5.4	498.6	0.7	342.6	1685.4	3.8	5	238.8
MA18	2.5	25	2.5	252.4	2092.8	2.7	5	154.8
MA21	2.5	176.2	2.3	152.8	1251	3	5	145.1
MA23	2.5	150.6	2.5	711.8	1199.3	2.5	5	156.6
MA36	4.4	349.5	2.5	235.8	1572.2	1.8	4.2	235
MA39	19	713.9	1	413.8	3730	4.1	5	216

5 Resultats

Des del 2016, la Diputació de Barcelona ha mostrejat 578 fonts de la província, realitzant 3543 anàlisis en total. L'anàlisi estadística de la distribució de dades mostra que els anys amb un major nombre de mostres analitzades són el 2021 (595 mostres) i el 2022 (633 mostres) (Figura 7.a); no obstant això, només els anys 2023 i 2024 disposen dels resultats analítics necessaris per realitzar una caracterització hidroquímica (ions majors). Les estacions amb un major nombre de mostres van ser la tardor (1475 mostres) i la primavera (1317 mostres) (Figura 7.b).

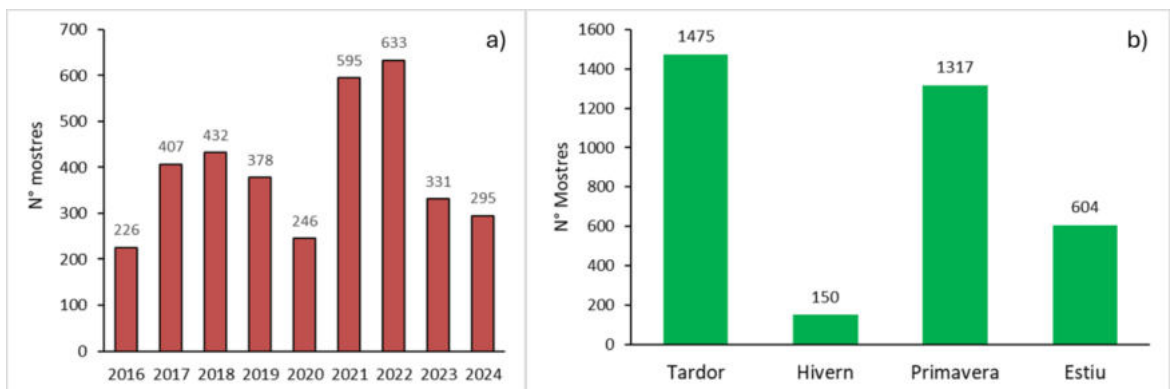


Figura 7: a) Distribució anual i històrica de les mostres de les fonts preses per la Diputació de Barcelona. b) Distribució estacional històrica del nombre de mostres de les fonts preses per la Diputació de Barcelona.

5.1 Paràmetres Físicoquímics

La distribució temporal dels paràmetres físicoquímics temperatura (°C), pH i conductivitat elèctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de les 3543 mostres analitzades des del 2016 fins al 2024, que es resumeixen a la Taula 4 i Figura 8, revela diverses tendències significatives.

Taula 4: Resum estadístic dels paràmetres fisicoquímics temperatura, pH i conductivitat elèctrica, entre 2016 i 2024.

	Període	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	TOTS
Temperatura (°C)	N	198	290	388	325	229	487	447	215	209	2788
	Min	3	2	4	4	4	4	4	3	3	2
	Q25	11.00	10.42	11.08	11.00	12.00	11.00	10.00	11.00	11.80	11.00
	Mediana	13.00	12.40	13.40	13.00	14.00	13.00	12.40	13.00	13.50	13.00
	Media	13.00	12.33	13.16	12.82	13.80	12.99	12.57	13.28	13.72	13.00
	Q75	15.00	14.50	15.00	14.50	16.00	15.00	15.00	16.00	16.00	15.00
	Max	20.00	20.20	24.00	22.00	26.00	21.10	21.00	22.00	25.00	26.00
	Std	2.81	3.29	2.81	2.92	3.09	3.10	3.24	3.76	3.39	3.17
pH	N	226	346	399	357	246	528	461	234	218	3015
	Min	7	6	7	6	7	7	6	7	7	6
	Q25	7.30	7.20	7.26	7.20	7.20	7.30	7.30	7.40	7.40	7.30
	Mediana	7.40	7.40	7.42	7.40	7.40	7.50	7.50	7.60	7.50	7.50
	Mitjana	7.45	7.46	7.48	7.47	7.44	7.54	7.56	7.61	7.56	7.51
	Q75	7.60	7.70	7.66	7.70	7.60	7.80	7.80	7.80	7.80	7.70
	Max	11.00	11.70	11.50	11.70	11.80	8.70	8.60	8.60	8.50	11.80
	Std	0.40	0.47	0.41	0.42	0.45	0.32	0.32	0.30	0.31	0.38
Conductivitat elèctrica (uS/cm)	N	226	346	399	356	246	528	461	234	218	3014
	Min	45	49	48	51	53	80	80	88	83	45
	Q25	605.50	540.25	564.00	562.75	606.50	595.00	571.00	583.75	596.50	579.00
	Mediana	776.00	695.00	730.00	753.50	789.50	747.50	737.00	761.00	776.50	748.00
	Mitjana	849.86	782.42	838.83	832.74	845.28	827.03	828.43	838.48	873.50	831.81
	Q75	1050.75	980.50	1060.00	1040.25	1033.00	1021.25	998.00	1045.00	1067.75	1028.00
	Max	2942.00	2769.00	2878.00	3090.00	3530.00	2695.00	3380.00	2499.00	2466.00	3530.00
	Std	382.91	375.36	424.70	410.94	393.79	379.38	416.30	385.53	391.58	397.55

5.1.1 Temperatura

L'anàlisi temporal de la temperatura a les fonts monitorades (Figura 8.a) revela un increment tèrmic progressiu a nivell de sistema. Considerant el conjunt de punts de mostreig distribuïts per tota la província, la temperatura mitjana ha augmentat de 13,0 °C el 2016 a 13,5 °C el 2024, amb un increment especialment notable durant el període 2023-2024. Aquest comportament ascendent reflecteix la influència de l'escalfament climàtic regional, sent especialment significatiu tenint en compte que els mesos de mostreig s'han mantingut comparables al llarg del període, amb un augment de la cobertura de mesos més freds durant 2023-2024.

La variabilitat tèrmica estacional mostra patrons diferenciats segons l'època de l'any. Durant els mesos d'estiu (juny-setembre), les temperatures de les fonts assoleixen els seus valors màxims, amb registres que poden superar els 18 °C en surgències superficials i zones de baixa altitud. En contrast, durant el període hivernal (desembre-març), les temperatures descendeixen, especialment a les zones de recàrrega d'alta muntanya on es registren valors mínims de 2 °C. Aquesta amplitud tèrmica estacional, reflectida en desviacions estàndard que oscil·len entre 2,81 °C i 3,76 °C, evidencia la diversitat de comportaments hidrogeològics presents al territori.

L'any 2020 destaca amb temperatures mitjanes particularment elevades (mediana: 14,0 °C, mitjana: 13,8 °C, màxim: 26 °C), mentre que el 2023 presenta la major variabilitat tèrmica registrada (Std: 3,76 °C). Aquestes dades són coherents amb les condicions climàtiques excepcionals documentades per l'AEMET per al període 2022-2023 (Téllez et al. 2024), que va registrar anomalies tèrmiques significatives a nivell peninsular. El 50 % de les mesures es concentren en l'interval 11-15 °C, tot i que els anys 2023 i 2024 mostren un desplaçament cap a intervals més càlids (percentil 75 de 16,0 °C), confirmant la tendència ascendent del sistema.

La presència de valors atípics en tots els anys evidencia l'existència de fonts amb comportaments tèrmics singulars, possiblement associats a surgències profundes o a la influència d'aigües termals en zones específiques del territori.

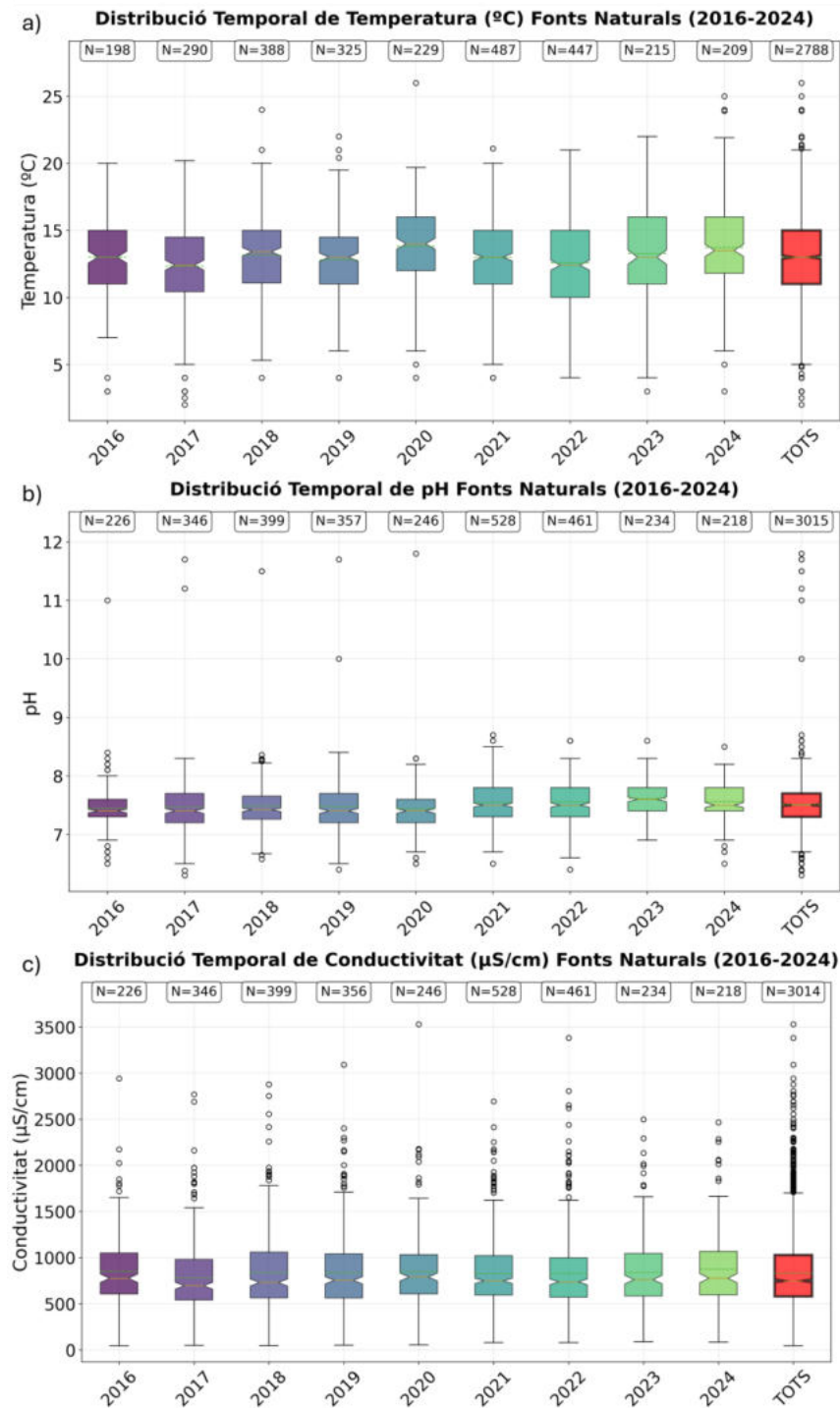


Figura 8: Distribució temporal dels principals paràmetres fisicoquímics a les Fonts Naturals durant el període 2016–2024; a) temperatura, b) pH i c) conductivitat elèctrica.

Els mapes de distribució espacial de temperatura per als anys 2023 i 2024 (Figura 9) revelen una clara zonació tèrmica controlada per factors hidrogeològics i topogràfics. La majoria de les fonts presenten temperatures en l'interval de 10-18 °C (punts verds), distribuïts de manera homogènia per tota la província i representatius del comportament tèrmic típic de les aigües subterrànies someres en clima mediterrani, que reflecteixen la temperatura mitjana anual de l'ambient.

Les fonts amb temperatures més fredes (<10 °C, punts blaus) es localitzen preferentment a les zones muntanyoses del nord i oest provincial, especialment a la capçalera del riu Llobregat (sector del Berguedà) i del riu Cardener (comarca del Solsonès). Aquestes fonts fredes estan associades a zones de recàrrega per infiltració ràpida de precipitació en sistemes aquífers carbonatats altament carstificats, on els temps de residència curts i l'altitud elevada mantenen temperatures baixes durant tot l'any.

En canvi, les fonts amb temperatures elevades (18-25 °C, punts taronges) presenten una distribució més dispersa, però amb concentracions significatives a: (1) la zona costanera del Garraf i Baix Llobregat, (2) sectors de la depressió central com el Bages i l'Anoia, i (3) punts aïllats en valls interiors. Aquestes fonts suggereixen fluxos subterranis més profunds o temps de residència prolongats, que permeten un major equilibri tèrmic amb el gradient geotèrmic regional. La presència d'aquestes surgències càlides a zones costaneres i a la depressió central indica surgències d'aquífers confinats o semiconfinats, on l'aigua circula a major profunditat abans d'emergir.

La comparació entre 2023 i 2024 mostra una distribució espacial similar, tot i que el 2024 presenta un lleuger increment en el nombre de fonts amb temperatures elevades, coherent amb la tendència ascendent observada en l'anàlisi temporal.

Des del punt de vista litològic, els aquífers carbonatats fissurats i els sistemes porosos presenten una major variabilitat tèrmica, reflectint tant surgències superficials ràpides com fluxos profunds més lents. Les zones de baixa permeabilitat en formacions metamòrfiques del nord provincial (materials paleozoics a la zona axial pirinenca) presenten surgències amb temperatures generalment més baixes, associades a fluxos locals superficials amb poca component regional.

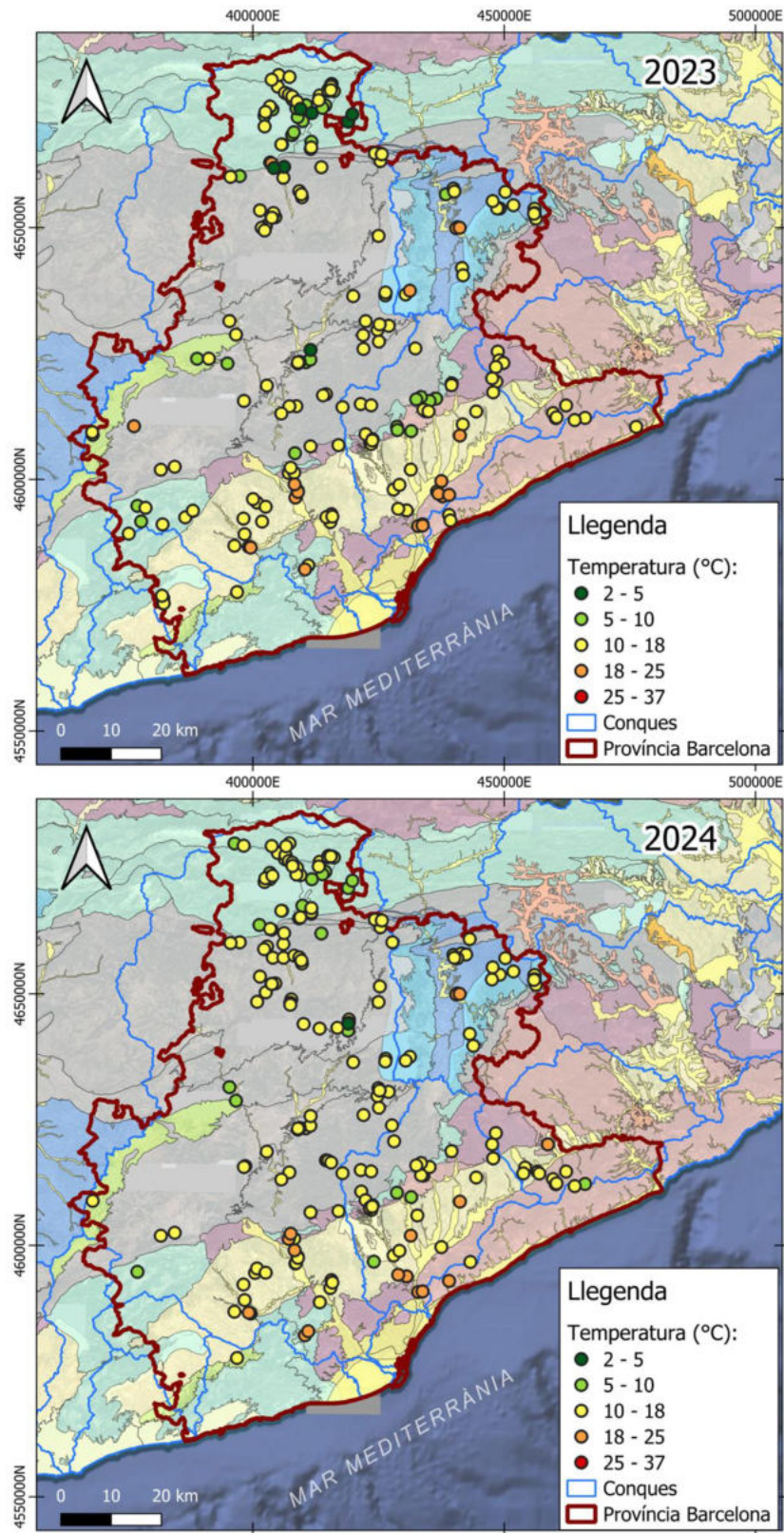


Figura 9: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les fonts mostrades durant el 2023 i el 2024.

5.1.1.1 Conclusió

L'anàlisi de temperatura revela tres aspectes fonamentals del sistema hidrogeològic provincial:

1. Tendència climàtica: L'increment tèrmic general i progressiu (0,5 °C entre 2016-2024) reflecteix l'impacte de l'escalfament global sobre els recursos hídrics subterranis, amb una acceleració en el període més recent.
2. Zonació hidrogeològica: La distribució espacial de temperatures delimita clarament tres dominis: (a) zones de recàrrega ràpida en aquífers carbonatats de muntanya ($T < 10$ °C), (b) sistemes de flux intermig en materials diversos ($T = 10-18$ °C), i (c) surgències de fluxos profunds o confinats ($T > 18$ °C).
3. Vulnerabilitat diferencial: Les fonts de zones de recàrrega més superficial mostren una major sensibilitat a les variacions climàtiques estacionals, mentre que les surgències de sistemes profunds actuen com a indicadors de condicions tèrmics més estables, potencialment útils per al monitoratge de canvis a llarg termini en el sistema hidrogeològic regional.

5.1.2 pH

Pel que fa al pH, l'anàlisi de l'evolució temporal a les fonts de la província de Barcelona durant el període 2016-2024 mostra un comportament relativament estable amb tendències subtils, però significatives (Taula 4 i Figura 8.b).

Els valors de pH es mantenen dins d'un rang neutre, però lleugerament alcalí, durant tot el període d'estudi. La mitjana d'aquests valors ha experimentat un increment gradual, passant de 7,40 el 2016 a 7,50 el 2024. Aquesta tendència ascendent és especialment notable a partir del 2021, on la mitjana s'estabilitza entre 7,50 i 7,60, suggerint un desplaçament progressiu cap a condicions lleugerament més alcalines.

El més revelador de l'anàlisi temporal és la notable reducció de la variabilitat a partir del 2021. La desviació estàndard es redueix de 0,40-0,47 (2016-2020) a 0,30-0,32 (2021-2024), fet que podria suggerir una major homogeneïtat hidrogeoquímica del sistema. Tanmateix, la desaparició dels valors anòmals extremadament alcalins ($\text{pH} > 11$) registrats entre 2016-2020 mereix especial atenció. Aquests valors són hidrogeoquímicament improbables en sistemes naturals d'aigua subterrània sense influència antròpica severa o condicions geològiques excepcionals (com la interacció amb roques ultrabàsiques). La seva absència a partir del 2021 suggereix que corresponien a errors de mesura, calibratge deficient dels equips o punts específics amb contaminació que han estat exclosos després de la depuració de la xarxa de monitoratge. Aquesta millora en la qualitat de les dades reforça la fiabilitat del sistema de vigilància actual.

Els valors mínims registrats ($\text{pH} 6,3$) apareixen puntualment en certes fonts i responen a condicions hidrogeològiques específiques: surgències en zones de recàrrega ràpida on l'aigua

meteòrica recent no ha tingut temps suficient per equilibrar-se amb els carbonats, o fonts en formacions silícies (granits, esquistos) on l'absència de minerals carbonatats impedeix la neutralització de l'aigua infiltrada, com la Font de Santa Maria de Montnegre (Sant Celoni) o la Font d'en Xa (Santa Maria de Palautordera).

Els mapes de distribució espacial de pH del 2023 i 2024 revelen patrons hidrogeoquímics estructurats (Figura 10), on la gran majoria dels fonts mostrejats presenten valors de pH en l'interval 7,0-8,3 (punts blau clar), distribuïts de manera pràcticament homogènia per tota la província. Aquesta dominància de valors neutres a lleugerament alcalins és característica de les aigües subterrànies que circulen per formacions carbonatades, on els processos de dissolució de calcita i dolomita exerceixen un fort control sobre el pH, establint condicions d'equilibri químic.

Les fonts amb pH més baix, lleugerament àcid a neutre (6,3-6,9) (punts negres i blau fosc a la Figura 9) es distribueixen de manera dispersa, però amb certa presència a les zones muntanyoses de la província, principalment a la Serralada Litoral i Prelitoral. Aquests valors lleugerament àcids a neutres (6,3-6,9) són coherents amb surgències en formacions silícies, com granits, pissarres i esquistos, o en zones de recàrrega amb alta influència d'aigua meteòrica recent i matèria orgànica del sòl. L'escassetat d'aquests punts el 2023 i 2024 contrasta amb les dades temporals anteriors, suggerint canvis en la xarxa de monitoratge. No obstant això, aquests punts, tot i ser minoritaris, són hidrogeològicament significatius perquè identifiquen sistemes de flux local i litologies no carbonatades.

L'absència total de gradients espacials pronunciats en el pH, a diferència d'altres paràmetres com la temperatura o la conductivitat, demostra l'eficiència dels processos de neutralització i el caràcter madur del sistema hidrogeològic. Fins i tot en una província geològicament diversa, el predomini de carbonats homogeneïtza les característiques àcid-base de pràcticament totes les fonts.

L'estabilitat espacial observada entre 2023 i 2024 confirma que el pH, un cop establert l'equilibri aigua-roca, és notablement resistent a les pertorbacions externes (variacions climàtiques, canvis en la recàrrega). Aquesta resiliència geoquímica contrasta amb la major sensibilitat de paràmetres com la temperatura o el contingut iònic, i converteix el pH en un indicador robust de les característiques litològiques fonamentals de cada sistema aquífer.

5.1.2.1 Conclusió

L'anàlisi del pH revela un sistema hidrogeològic provincial dominat per aqüífers carbonatats en estat de maduresa geoquímica:

1. Buffer carbonat regional: El predomini absolut de valors neutres a bàsics (7,0-8,3) és una evidència que els carbonats mesozoics i terciaris controlen la hidroquímica de les aigües subterrànies a escala provincial. Aquest efecte també protegeix el sistema de l'acidificació i manté condicions químiques favorables per a la qualitat de l'aigua.
2. Maduresa del sistema: La convergència cap a valors homogènies indica que els aqüífers principals tenen temps de residència suficientment prolongats per assolir l'equilibri termodinàmic. Això implica sistemes de flux regional ben desenvolupats, no només fluxos locals superficials.
3. Eina de caracterització litològica: El pH funciona com a traçador litològic natural. Les fonts amb pH lleugerament àcid a neutre (<7,0) identifiquen les escasses zones amb litologies silícies o sistemes de flux extremadament ràpid, proporcionant informació hidrogeològica valuosa sobre l'estructura del sistema sense necessitat d'investigacions directes. En canvi, valors neutres a alcalins (7,0-8,3) evidencien zones de flux en roques carbonatades.

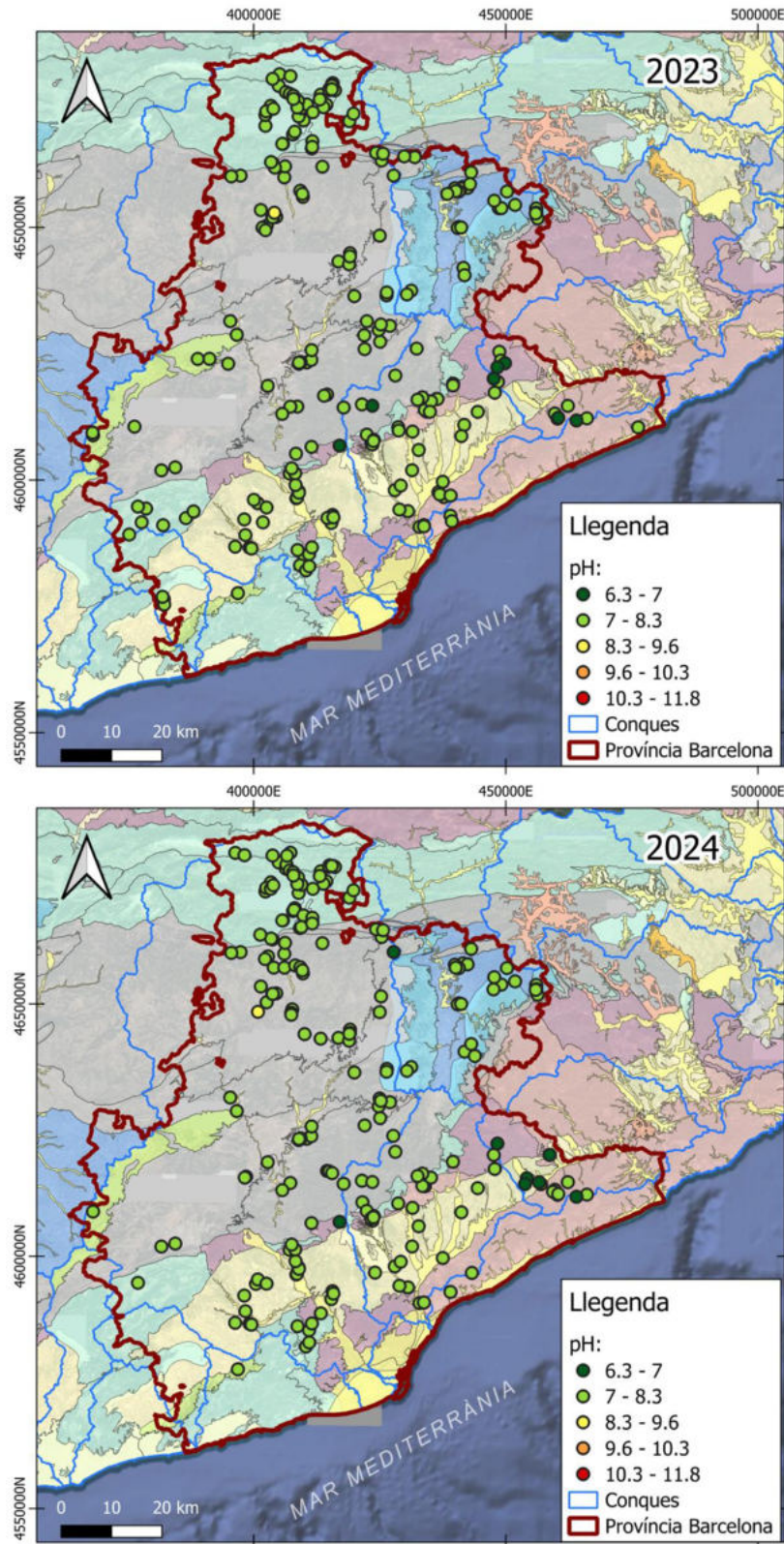


Figura 10: Distribució espacial del pH de les fonts mostrejades durant el 2023 i 2024.

5.1.3 Conductivitat Elèctrica

La conductivitat elèctrica (CE) actua com a proxy directe de la mineralització total de l'aigua i, per tant, del grau d'interacció aigua-roca i temps de residència a l'aquífer. A diferència del pH, que tendeix a estabilitzar-se per efecte tampó, la CE integra la contribució de tots els ions dissolts i resulta més sensible a canvis en les condicions hidrogeològiques.

L'anàlisi de l'evolució temporal a les fonts de la província de Barcelona durant el període 2016-2024 mostra un comportament estable amb valors característics d'aigües subterrànies en medis carbonatats (Taula 4 i Figura 8.c) durant tot el període d'estudi. Entre el 2016 i el 2020, la mitjana oscil·la entre 695.0 $\mu\text{S/cm}$ i 789.5 $\mu\text{S/cm}$, amb un valor global de 748.0 $\mu\text{S/cm}$. No s'observa una tendència clara d'augment o de disminució sostinguda, encara que hi ha una certa variabilitat interanual. No obstant això, els anys recents (2023: 761 $\mu\text{S/cm}$; 2024: 776.5 $\mu\text{S/cm}$) presenten valors lleugerament superiors a la mitjana històrica. Aquest increment gradual és coherent amb el perllongat període de sequera que va afectar a la província, on la reducció de la recàrrega disminueix l'efecte de dilució i augmenta la concentració relativa de sals dissoltes. En situacions de dèficit hídric, la contribució proporcional de fluxos profunds més mineralitzats s'incrementa respecte dels fluxos superficials menys mineralitzats, elevant la CE mitjana del sistema.

El 50% de les mostres tenen conductivitats entre 579.0 i 1028.0 $\mu\text{S/cm}$, indicant una amplitud d'aproximadament 450 $\mu\text{S/cm}$. Aquesta dispersió moderada reflecteix la diversitat hidrogeològica del territori, amb aquífers de diferent litologia, profunditat i temps de residència. També poden suggerir influència antròpica en les característiques químiques de l'aigua. La mitjana global (831.81 $\mu\text{S/cm}$) és lleugerament superior a la mitjana (748.0 $\mu\text{S/cm}$), cosa que indica una distribució lleugerament asimètrica amb influència de valors elevats.

La desviació estàndard es manté relativament constant entre 375 i 425 $\mu\text{S/cm}$ durant tot el període, evidenciant una variabilitat inherent al sistema, però sense canvis dràstics en la dispersió de dades. Els valors mínims registrats són consistentment baixos, oscil·lant entre 45-88 $\mu\text{S/cm}$, característics de fonts en medis silícics o de recàrrega molt recent amb baixa interacció aigua-roca. Els valors màxims són considerablement elevats, assolint fins a 3530 $\mu\text{S/cm}$ (2020), amb diversos anys superant els 3000 $\mu\text{S/cm}$. Aquests valors extraordinaris indiquen la presència de fonts amb alta mineralització, possiblement associades a circulació profunda, llargs temps de residència, influència de formacions evaporítiques o impacte antròpic.

La persistència d'outliers (>1500 $\mu\text{S/cm}$) al llarg de tota la sèrie temporal és reveladora. L'anàlisi d'aquests valors anòmals confirma que la majoria (26 fonts) correspon a fonts específiques amb conductivitat persistentment elevada (Font de la Fullaraca (Castellbisbal), Font del Cabrer (Castellbisbal), Font del Corró (Corbera de Llobregat), Font del Balç (Fonollosa), entre altres), i no a errors de mesurament temporals. Les altres fonts (25) presenten un únic registre anòmal en 8 anys de monitoratge, suggerint possibles errors puntuals. Aquesta estabilitat temporal dels outliers indica que responen a condicions hidrogeològiques particulars i permanents: sistemes de flux profund regional, presència

d'evaporites en profunditat, o aqüífers confinats amb circulació lenta que maximitzen la dissolució mineral.

Els mapes de distribució espacial de la conductivitat elèctrica revelen patrons hidrogeoquímics altament estructurats i relacionats amb la litologia (Figura 11). La gran majoria de les fonts mostrejades presenten valors de conductivitat en el rang 200-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punts verds), distribuïts de manera generalitzada per tota la província. Aquest rang és característic d'aigües subterrànies amb mineralització moderada, típica d'aqüífers carbonatats en clima mediterrani, on la dissolució de calcita i dolomita aporta ions calci, magnesi i bicarbonat a l'aigua.

Les fonts amb conductivitat molt baixa, 0 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punts negre i blau; Figura 11), són escasses i es distribueixen principalment a les zones muntanyoses del nord i oest provincial (Montseny, Sant Celoni, Sant Pere de Vilamajor, El Brull), coincidint espacialment amb les mateixes àrees on es reconeix el pH més àcid. Aquesta correspondència espacial no és casual: ambdós paràmetres reflecteixen la presència de formacions silíciques del basament paleozoic (granits, pissarres, esquistos metamòrfics). Aquests materials tenen una solubilitat mineral extremadament baixa, de manera que fins i tot després de circular per l'aqüífer, l'aigua manté una CE mínima. A més, moltes d'aquestes fonts corresponen a fluxos locals superficials de recàrrega recent, on el temps de contacte aigua-roca és insuficient per desenvolupar mineralització apreciable.

Els punts taronges i vermell fosc (Figura 11), corresponents a conductivitats elevades (entre 1500 i 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), es distribueixen de manera dispersa, però amb certa concentració en determinades zones. El 2023 s'observen alguns punts d'alta mineralització en àrees centrals i fluvials. Al 2024 apareix una major densitat de punts amb conductivitats superiors a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, principalment als mateixos llocs que el 2023. Aquestes fonts poden reflectir diferents processos: circulació profunda amb temps de residència llargs que permeten una major dissolució mineral, dissolució de minerals en formacions evaporítiques (guixos, sals), aqüífers confinats o semiconfinats amb fluxos regionals, o bé possible influència de contaminació difusa per activitat agrícola o urbana.

La comparació entre ambdós anys mostra una distribució espacial similar en termes generals, tot i un aparent increment en el nombre de fonts amb conductivitats en el rang 1500-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el 2024. Davant l'estrès hídric, tres mecanismes actuen sinèrgicament: (1) reducció de la recàrrega que disminueix l'efecte de dilució, concentrant sals a l'aigua residual de l'aqüífer; (2) descens dels nivells piezomètrics que redueix la contribució de fluxos superficials poc mineralitzats i augmenta proporcionalment els fluxos profunds més mineralitzats; (3) increment relatiu del temps de residència mitjà de l'aigua al sistema, permetent una major dissolució.

No s'observen gradients espacials regionals clars de conductivitat elèctrica a escala provincial. La distribució sembla controlada per factors locals (litologia específica, estructura geològica, profunditat de circulació) més que per patrons de flux regional coherents. Tot i això, existeix certa tendència a concentracions de valors elevats a la depressió central i a les zones

costaneres, possiblement relacionada tant amb factors geològics (presència d'evaporites terciàries) com amb major pressió antròpica.

5.1.3.1 Conclusió

L'anàlisi de la conductivitat elèctrica proporciona tres idees fonamentals sobre el sistema hidrogeològic provincial:

1. Conductivitat elèctrica com a indicador d'estrès hídric: L'increment de la C.E. el 2023-2024 no és un dada aïllada, sinó un senyal hidrogeoquímic de l'impacte de la sequera prolongada sobre els aqüífers. La concentració de sals per reducció de la recàrrega i el predomini creixent de fluxos profunds mineralitzats evidencien que el sistema està sota estrès hídric. Aquest comportament converteix la C.E. en un paràmetre guia per monitoritzar l'estat dels aqüífers davant el canvi climàtic.
2. Cartografia de sistemes de flux: La distribució espacial de la conductivitat funciona com un mapa tridimensional indirecte del sistema. Els valors baixos (<200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) identifiquen zones de recàrrega ràpida en materials silícics; els valors moderats (200-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) delimiten els sistemes de flux ràpid a intermedi en carbonats que constitueixen el recurs híbrid principal; els valors elevats (>1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) assenyalen fluxos profunds regionals, zones amb evaporites o zones de forta pressió antròpica.
3. Heterogeneïtat hidrogeoquímica persistent: L'estabilitat temporal dels punts amb conductivitat elevada (outliers) mostra que el territori provincial és hidrogeològicament heterogeni, allotjant múltiples sistemes amb funcionaments diferenciats. La coexistència de fonts amb C.E. des de 45 fins a 3530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ reflecteix la complexitat del sistema: des de fluxos locals superficials en silicats fins a sistemes regionals profunds en evaporites, passant per aqüífers carbonatats típics. Aquesta diversitat requereix estratègies de gestió diferenciades segons el tipus d'aqüífer.

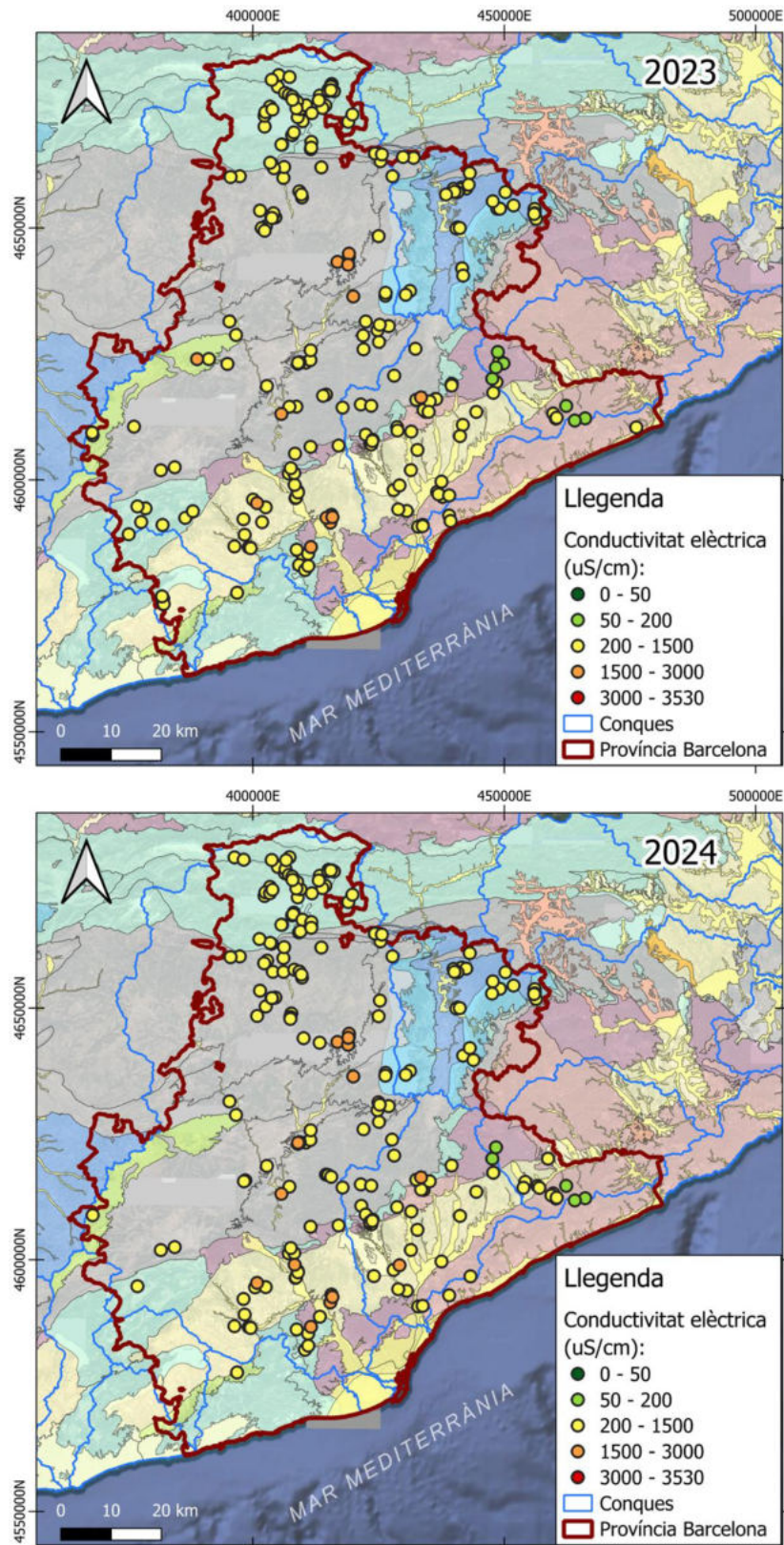


Figura 11: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de les fonts mostrejades durant el 2023 i 2024.

5.2 Caracterització Hidroquímica

L'anàlisi hidroquímica de 451 mostres de fonts (233 el 2023 i 218 el 2024) revela un sistema hidrogeològic fortament controlat per processos de dissolució de carbonats (Figures 12 i Taula 5). La fàcies bicarbonatada càlcica representa el 61,2 % del total, establint-se com la signatura hidroquímica dominant del territori. Aquesta predominança reflecteix l'extensió i productivitat dels aqüífers carbonatats mesozoics i terciaris que constitueixen l'estructura hidrogeològica principal de la província.

La segona fàcies més abundant és la sulfatada càlcica (6,65 %), la presència de la qual, localitzada però significativa, indica zones específiques amb influència de formacions evaporítiques triàsiques (guixos) o, en menor mesura, possible impacte d'activitats agrícoles. El 32 % restant correspon a fàcies mixtes i transicionals que reflecteixen processos d'evolució hidroquímica, barreja d'aigües de diferents orígens o influència de litologies minoritàries.

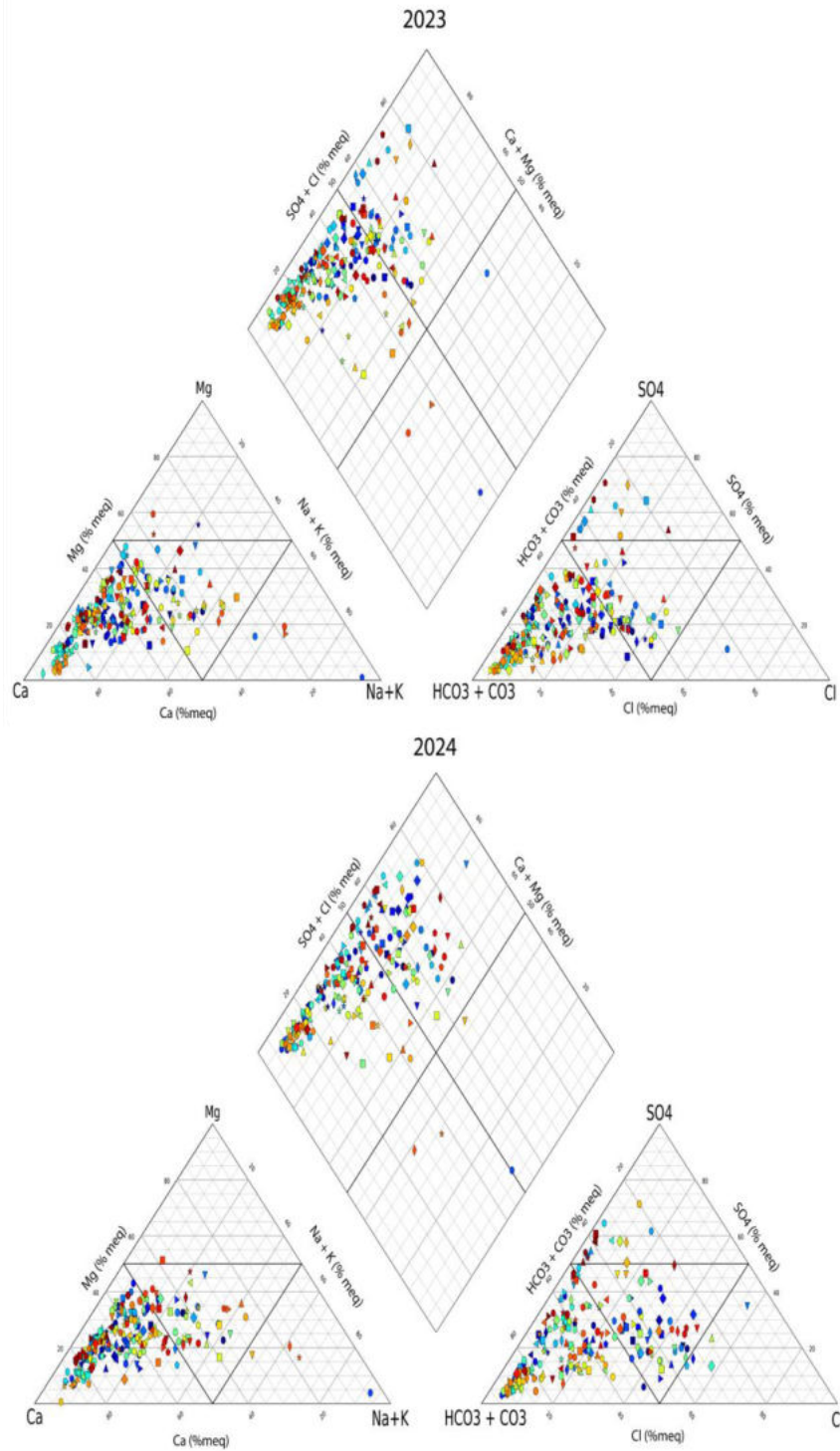


Figura 12: Diagrames Piper per a les fonts analitzades el 2023 i 2024.

Taula 5: Percentatge de fàcies cada any i en el total de mostres.

2023	2024	Total
65,24% Bicarbonatada càlcica	56,88% Bicarbonatada càlcica	61,20% Bicarbonatada càlcica
5,57% Sulfatada càlcica	7,80% Sulfatada càlcica	6,65% Sulfatada càlcica
4,72% Bicarbonatada càlcica/magnèsica	5,05% Bicarbonatada/sulfatada càlcica	3,77% Bicarbonatada/sulfatada càlcica
3,00% Bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica	4,13% Bicarbonatada/clorurada càlcica	3,10% Bicarbonatada càlcica/magnèsica
2,57% Bicarbonatada/sulfatada càlcica	2,75% Bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica	3,10% Bicarbonatada/clorurada càlcica
2,15% Bicarbonatada/clorurada càlcica	2,29% Clorurada/bicarbonatada càlcica/sòdica	2,88% Bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica
2,15% Bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica	1,83% Clorurada/bicarbonatada càlcica	1,77% Bicarbonatada/sulfatada càlcica /magnèsica
1,72% Bicarbonatada sòdica/càlcica	1,83% Clorurada/bicarbonatada sòdica/càlcica	1,55% Clorurada/bicarbonatada càlcica/sòdica
1,29% Bicarbonatada càlcica/sòdica	1,38% Bicarbonatada càlcica/magnèsica	1,33% Bicarbonatada càlcica/sòdica
1,29% Bicarbonatada sòdica	1,38% Bicarbonatada/ sòdica	1,11% Bicarbonatada sòdica/ càlcica

El resum de les característiques fisicoquímiques (temperatura, pH i conductivitat elèctrica) de cada fàcies predominant, en cada unitat hidrogeològica, es detalla a la Taula 6.

L'anàlisi de la Taula 6 evidencia un fort control litològic, on la geologia determina clarament la signatura hidroquímica de les fonts.

Els aqüífers en medi fissurat (calcàries i gresos) presenten la major homogeneïtat hidroquímica del sistema: el 100 % de les mostres corresponen a fàcies bicarbonatades càlciques (Taula 6). Aquest comportament homogeni reflecteix un control litològic absolut, on la dissolució de calcita (CaCO_3) domina completament la química de l'aigua.

Les característiques fisicoquímiques són notablement consistents: temperatures entre 9,0 i 13,5 °C, conductivitat moderada (664-986 $\mu\text{S}/\text{cm}$) i pH lleugerament bàsic (7,2-7,9). Aquesta uniformitat indica sistemes de flux relativament simples, sense interferències litològiques secundàries ni impactes antròpics significatius.

Els aqüífers en medi fissurat i carstificat (calcàries i gresos) mantenen la predominança de fàcies bicarbonatades càlciques (70,45%), tot i que s'observa una major diversitat. L'aparició de fàcies sulfatades càlciques (16,67%) assenyalen la presència de nivells evaporítics intercalats en la successió carbonatada, on la dissolució de guix ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) competeix amb la calcita com a font de calci i afegeix sulfats a l'aigua. L'amplitud de la conductivitat elèctrica (282-2294 $\mu\text{S}/\text{cm}$) i la temperatura (3,0-20,0°C) reflecteix l'heterogeneïtat estructural característica d'un sistema càrstic, on coexisteixen surgències de flux ràpid poc mineralitzades (fractures i conductes de recàrrega directa) amb surgències de flux lent altament mineralitzades (xarxes de fissures profundes amb llargs temps de residència).

Els aqüífers en medi porós i fissurat (calcàries i gresos) presenten una composició intermèdia, amb un 90% de fàcies bicarbonatades càlciques, tot i que apareix de manera minoritària la fàcies bicarbonatada/clorurada càlcica (5%). Aquesta component clorada, absent en els sistemes purament fissurats, suggereix una major vulnerabilitat a la influència antròpica a causa de la porositat primària que facilita la infiltració difusa, o bé barreja amb aigües més profundes de major salinitat.

Taula 6: Resum de les característiques fisicoquímiques de cada fàcies dominant a cada unitat hidrogeològica.

Unitat Hidrogeològica	Fàcies	Percentatge a UHG	Mostres Fàcies	Temp (°C)	C.E (µS/cm)	pH	Total mostres a UHG
Aqüífer en medi fissurat (calcàries i gresos)	Bicarbonatada càlcica	100	16	9.0 - 13.5	664 - 986	7.2 - 7.9	16
Aqüífer en medi fissurat i carstificat (calcàries i gresos)	Bicarbonatada càlcica	70.45	93	3.0 - 20.0	282 - 1277	7.2 - 8.2	132
	Sulfatada càlcica	16.67	22	9.0 - 15.0	700 - 2294	7.2 - 7.9	
Aqüífer en medi porós i fissurat (calcàries i gresos)	Bicarbonatada càlcica	90	18	8.4 - 17.0	476 - 945	7.2 - 8.0	20
	Bicarbonatada/clorurada càlcica	5	1	18.0 - 18.0	1306 - 1306	7.1 - 7.1	
Aqüífer porós en formacions carbonatades	Bicarbonatada càlcica	71.43	5	11.0 - 15.0	533 - 1095	7.3 - 7.8	7
	Sulfatada/bicarbonatada magnèsica/càlcica	14.29	1	13.0 - 13.0	1045 - 1045	7.6 - 7.6	
Aqüífer porós en medi al·luvial-col·luvial	Bicarbonatada càlcica	27.08	13	11.0 - 24.0	356 - 1245	7.1 - 8.0	48
	Bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica	14.58	7	8.9 - 18.2	1253 - 1664	7.4 - 7.7	
Aqüífer porós en medi detrític granular (rebliments neògens i quaternaris)	Bicarbonatada càlcica	34.69	17	10.0 - 19.5	640 - 1405	7.2 - 8.1	49
	Bicarbonatada/sulfatada càlcica	12.24	6	16.0 - 19.0	933 - 1129	7.2 - 8.0	
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en detrítics i margocalcaris	Bicarbonatada càlcica	66.17	88	4.0 - 18.0	428 - 1234	7.0 - 8.2	133
	Sulfatada càlcica	5.26	7	10.0 - 15.9	1385 - 1858	7.4 - 8.1	
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions granítiques	Bicarbonatada càlcica	62.96	17	12.5 - 21.3	532 - 1221	6.9 - 8.3	27
	Bicarbonatada sódica/magnèsica	7.41	2	13.8 - 14.5	142 - 144	6.9 - 7.0	
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions metamòrfiques	Bicarbonatada càlcica	47.37	9	6.0 - 18.1	499 - 1045	7.2 - 7.8	19
	Bicarbonatada sódica/càlcica	15.79	3	12.0 - 15.0	88 - 111	6.9 - 7.0	

Els aqüífers porosos en formacions carbonatades afegeixen complexitat amb l'aparició de fàcies sulfatades/bicarbonatades magnèsiques/càlciques (14,29%), indicant la presència de dolomies ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) o intercalacions evaporítiques. El magnesi com a catió secundari revela processos de dolomitització o dissolució preferencial de dolomita.

Els aqüífers porosos en medi al·luvial-col·luvial mostren la major heterogeneïtat composicional, amb coexistència de múltiples fàcies. La presència significativa de fàcies bicarbonatades/clorurades càlciques/magnèsiques (14,58%) i l'àmplia dispersió de conductivitat (356-1664 $\mu\text{S}/\text{cm}$) reflecteixen la complexitat d'aquests sistemes. Els aqüífers al·luvials tendeixen a ser zones de mescla (interacció riu-aqüífer, recàrrega per precipitació, trànsit de fluxos laterals). En el cas de la zona d'estudi, aquests processos poden incloure: (1) aigües de recàrrega local recent poc mineralitzades, (2) fluxos laterals des d'aqüífers carbonatats circumdants, (3) retorns de reg amb sals i fertilitzants, i (4) possibles aportacions d'aigües residuals urbanes. El component clorurat és un indicador de pressió antròpica, especialment rellevant en valls amb agricultura intensiva o àrees urbanitzades.

Els aqüífers porosos en medi detrític granular presenten fàcies bicarbonatades/sulfatades càlciques (12,24%), fet que suggereix processos d'oxidació de matèria orgànica (que produeix sulfats) o el contacte amb nivells que contenen guixos en la seqüència detrítica terciària.

Els medis de baixa permeabilitat en formacions granítiques introdueixen una signatura hidroquímica diferencial. Encara que predominen les fàcies bicarbonatades càlciques (62,96%), consistent amb una recàrrega d'aigües meteòriques recent, l'aparició de fàcies bicarbonatades sòdiques/magnèsiques (7,41%) és hidrogeològicament significativa. El sodi pot provenir de l'alteració química de feldespats (plagiòclasis, ortòclasis), un procés típic de la meteorització de roques granítiques. La reacció d'hidròlisi dels feldespats allibera Na^+ i K^+ a l'aigua, modificant la composició catiònica.

Els medis de baixa permeabilitat en formacions metamòrfiques mostren un comportament similar, amb fàcies bicarbonatades sòdiques (15,79%) que reflecteixen l'alteració de minerals silicats en pissarres i esquists. La major proporció de sodi respecte dels granits pot estar relacionada amb una composició mineralògica diferent o amb un grau més elevat de fracturació que intensifica els processos d'alteració.

En tots dos casos, no es descarta la influència antròpica com a font addicional de sodi (sals de desgel, aigües residuals), especialment en zones amb pressió urbanística.

La Figura 13 mostra la distribució espacial de la caracterització hidroquímica de les fonts analitzades el 2023 i el 2024.

L'anàlisi hidroquímic de les fonts de la província de Barcelona revela una gran diversitat de fàcies hidroquímiques, controlades majoritàriament per la litologia dels aqüífers i els processos d'interacció aigua-roca.

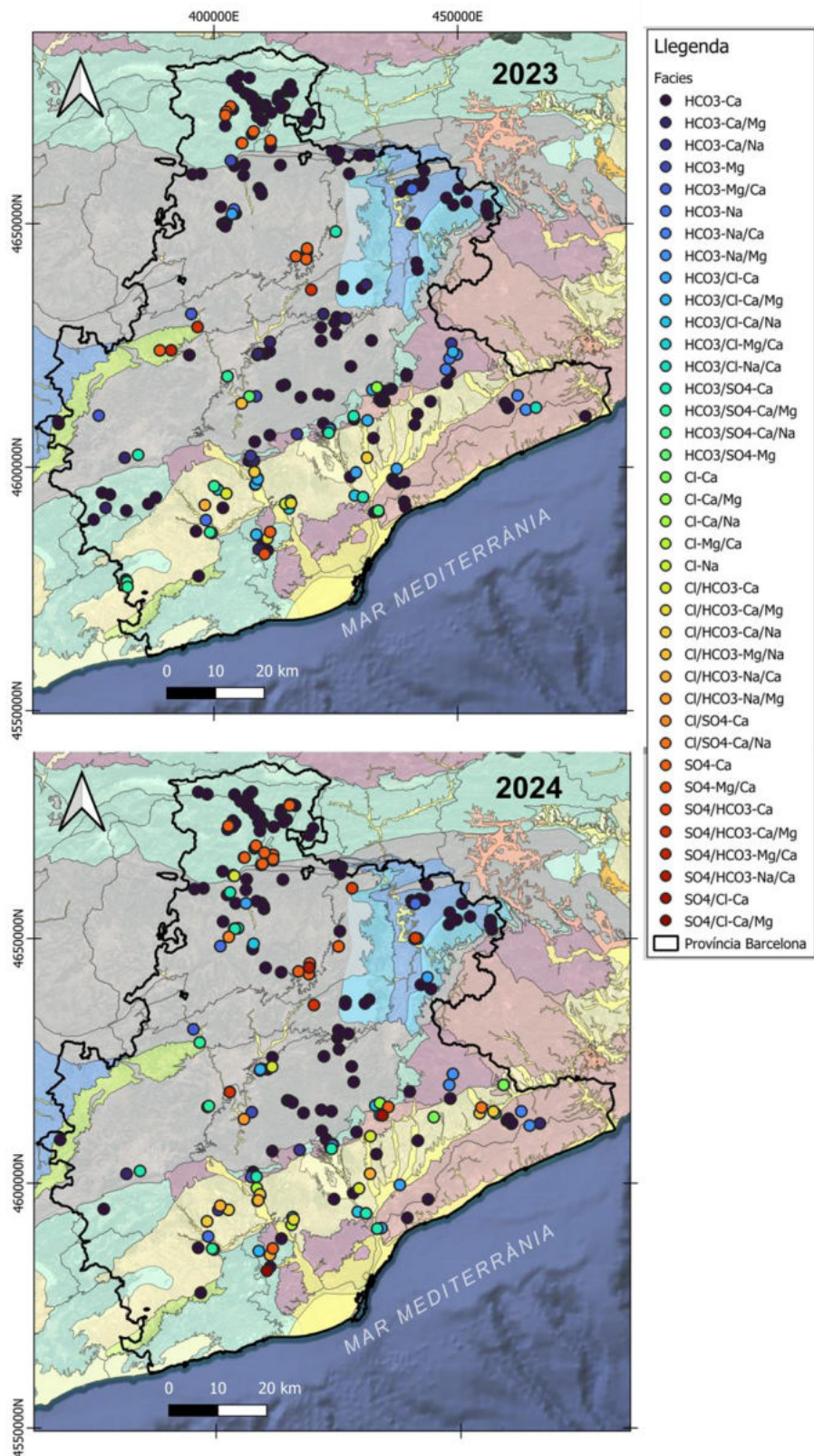


Figura 13: Distribució de les fàcies hidroquímiques de les fonts analitzades el 2023 i 2024.

Analitzant espacialment la distribució de cada fàcies (Figura 13), es pot observar que les zones amb fàcies bicarbonatades càlciques ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$, punts negres) es distribueixen àmpliament per tota la província, amb una major densitat a les zones on aflora material carbonatat (centre, nord, nord-est i sud de la província). Aquesta fàcies representa el tipus hidroquímic més comú i característic del territori, i reflecteix la dissolució predominant de calcita en les formacions carbonatades del Mesozoic i del Terciari, així com la recàrrega d'aigües meteòriques recents en un sistema amb ràpida renovació.

Els punts en tons blaus representen fàcies bicarbonatades amb diferents combinacions catióniques (Ca, Mg, Na+K). Les fàcies $\text{HCO}_3\text{-Ca/Mg}$ (blau intermedi) se situen preferentment en zones amb presència de dolomies o materials amb un contingut significatiu de magnesi. Les fàcies $\text{HCO}_3\text{-Na}$ o $\text{HCO}_3\text{-Na/Ca}$ (blau clar) apareixen de manera dispersa, principalment en zones de materials silícics o metamòrfics on l'alteració de feldespatos i altres silicats aporta sodi a l'aigua.

Els punts en tons verds i grocs representen aigües amb un component clorurat significatiu. L'any 2023, aquestes fàcies es distribueixen de manera dispersa, però amb una certa concentració a les zones costaneres i a les valls al·luvials. L'any 2024, s'observa un increment aparent d'aquestes fàcies, especialment a les zones central i sud-est de la província. La presència de clorurs pot indicar contaminació difusa per activitats agrícoles (fertilitzants, purins), influència d'aigües residuals urbanes i, en alguns casos, mescla amb aigües més profundes de major salinitat. Cal assenyalar que, a la zona NO de la conca del Llobregat, hi ha les mines de sal de Cardona, els residus de la seva extracció poden fluir aigües avall, pel curs del riu, afectant la composició de les aigües de les fonts. Donada la ubicació de les mostres clorurades, es descarta una influència d'intrusió salina a les zones costaneres.

Els punts en tons taronja i vermell representen aigües amb un contingut significatiu de sulfats. Aquestes fàcies apareixen de manera puntual però consistent en tots dos anys, principalment en zones amb presència de formacions evaporítiques (guixos del Triàsic) o possibles zones amb influència de contaminació agrícola (fertilitzants sulfatats). La distribució de les fàcies $\text{SO}_4\text{-Ca}$ (taronja clar) i de les fàcies mixtes SO_4/HCO_3 (vermell fosc) suggereix diferents graus d'evolució hidrogeoquímica i processos de mescla entre diferents tipus d'aigua: des d'aigües que han interaccionat intensament amb guixos fins a aigües en transició amb mescla de fluxos carbonatats i evaporítics.

La distribució espacial de fàcies mostra una forta correlació amb les unitats hidrogeològiques identificades prèviament. Les zones amb predomini de materials carbonatats (centre, nord, nord-est i sud) presenten majoritàriament fàcies bicarbonatades càlciques. Les àrees amb materials silícics o metamòrfics (principalment nord i oest) mostren una major diversitat de fàcies, incloent-hi tipus bicarbonatats sòdics. Les zones al·luvials i de depressió central presenten la major heterogeneïtat hidroquímica, reflectint processos de mescla, un temps de residència més elevat i una possible influència antròpica.

5.2.1.1 Conclusió

La caracterització hidroquímica revela tres aspectes fonamentals del sistema hidrogeològic provincial:

1. Domini carbonatat amb evolució diferencial: El territori funciona hidroquímicament com un sistema carbonatat, on el 61,2% de les fonts presenta fàcies bicarbonatades càlciques pures. Tot i això, aquest domini no és homogeni: l'evolució des de sistemes fissurats simples (100% $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, homogeneïtat total) cap a sistemes carstificats (70% $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, aparició de SO_4) i finalment al·luvials (27% $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, màxima diversitat) reflecteix la complexitat hidrogeològica. Aquesta gradació respon a la heterogeneïtat litològica, al temps de residència i al grau de mescla entre diferents fluxos.
2. Les fàcies hidroquímiques són traçadors de processos: Cada fàcies, a més de ser una classificació, és un indicador de processos actius. Les fàcies bicarbonatades càlciques tracen la dissolució de calcita o la recàrrega meteòrica recent; les sulfatades càlciques assenyalen la presència d'evaporites; les sòdiques identifiquen l'alteració de silicats; les clorurades alerten sobre pressió antròpica. Això converteix el mapa de fàcies en una eina de diagnòstic, ja que permet identificar zones vulnerables a contaminació (al·luvials amb fàcies clorurades), àrees amb recursos d'ús diferent segons la qualitat (sulfatades per a usos no potables) o sectors amb fluxos profunds (alta mineralització en carbonats carstificats).
3. Existeix una vulnerabilitat diferencial als impactes antròpics: L'aparició de fàcies clorurades principalment en sistemes al·luvials i detrítics, amb un aparent increment 2023-2024, evidencia que no tots els aqüífers són igualment vulnerables. Els sistemes carbonatats fissurats mantenen la seva signatura hidroquímica prístina (100% $\text{HCO}_3\text{-Ca}$) gràcies al flux preferencial per fractures que minimitza la infiltració difusa. En contrast, els sistemes porosos al·luvials actuen com "esponges" que capturen i integren qualsevol aportació antròpica. Aquesta vulnerabilitat diferencial ha de guiar les estratègies de protecció: mentre els carbonats fissurats toleren certa pressió territorial, els al·luvials requereixen protecció estricta de les seves àrees de recàrrega.

5.2.2 Canvis de Fàcies

L'anàlisi de canvis de fàcies entre un any i un altre (2023 i 2024 per a aquest estudi; Figura 14) permet estudiar les trajectòries evolutives de l'aigua subterrània durant el seu flux. Aquests canvis de fàcies reflecteixen processos específics, com ara una interacció progressiva aigua-roca, una mescla de fluxos d'origen diferent, un intercanvi catiònic en argiles, o la incorporació de contaminants antròpics. El tipus de canvi en la seva signatura química i la seva distribució espacial permeten estudiar l'arquitectura del sistema de flux subterrani i les pressions a què està sotmès.

A escala provincial, la comparació entre tots dos anys mostra una distribució general similar, tot i que amb matisos hidrogeològics importants (Figura 14). L'any 2024 augmenta la proporció

de fàcies amb component clorurat i sulfatat, particularment a zones de plana i àrees amb major pressió antròpica. Aquest canvi podria estar relacionat amb els efectes de la sequera que afecta el territori, mitjançant la dissolució o concentració de sals als aqüífers, una major influència relativa dels retorns de reg i la contaminació difusa en disminuir els fluxos naturals que dilueixen aquests aportacions, o per la reducció de la recàrrega que disminueix l'efecte de dilució natural.

Els canvis de fàcies observats (Figura 14) reflecteixen la progressiva interacció aigua-roca, processos de mescla i, en alguns casos, possible influència antròpica.

Els punts negres i tons foscos representen fonts que evolucionen des de fàcies bicarbonatades càlciques cap a altres tipus hidroquímiques. Aquesta és la trajectòria evolutiva més comuna al territori i reflecteix el funcionament fonamental del sistema hidrogeològic provincial. La capçalera del riu Llobregat, per exemple, és una zona de recàrrega per infiltració de precipitació (recàrrega meteòrica), la qual és bicarbonatada, i en fluir per l'aqüífer calcari, dissol progressivament minerals carbonatats, adquirint la fàcies bicarbonatada càlcica que caracteritza les fonts de recàrrega recent. Aquesta és la fàcies hidroquímica "base" del territori.

L'evolució cap a fàcies bicarbonatades sòdiques és típica de fluxos que travessen materials silícics, on l'alteració de feldspats i miques allibera Na^+ , o on es produeix intercanvi catiònic (Ca^{2+} per Na^+) en argiles, on el Ca^{2+} dissolt s'adsorbeix a les argiles i és reemplaçat per Na^+ . Aquesta transició s'observa principalment a zones del nord i de l'oest amb presència de formacions metamòrfiques o granítiques. La distribució espacial (zones amb basament paleozoic metamòrfic i granític) confirma el control litològic com a mecanisme dominant, tot i que en valls al·luvials l'intercanvi catiònic pot contribuir de manera significativa.

També s'observa una evolució de fàcies bicarbonatada càlcica cap a una fàcies que incorpora sulfats mantenint el caràcter bicarbonatat. Aquesta trajectòria, distribuïda de manera irregular al territori, suggereix un contacte prolongat amb formacions que contenen guixos (els guixos del Triàsic) o processos d'oxidació de sulfurs. La distribució espacial no aleatòria suggereix un control geològic estructural, on els punts s'associen a falles o zones de contacte on afloren formacions evaporítiques.

L'evolució cap a fàcies clorurades càlciques indica la incorporació significativa de clorur. Aquesta evolució és hidrogeològicament ambigua i requereix anàlisi contextual per interpretar-la. Apareix principalment en zones de plana, àrees al·luvials-fluviàlies, i corredors dels rius Llobregat i Besòs. En aquests contextos, el clorur pot provenir de: (1) barreja amb aigües subterrànies profundes de major salinitat que puguen per l'explotació de l'aqüífer, (2) infiltració de retorns de reg amb sals acumulades per evapotranspiració, (3) fuites de xarxes de sanejament urbà, o (4) aplicació de fertilitzants. La concentració espacial a zones d'alta pressió antròpica (vall del Llobregat baix, àrea metropolitana de Barcelona, zones agrícoles del Vallès) suggereix predomini d'origen antròpic. L'absència d'aquesta evolució a zones costaneres més allunyades de nuclis urbans descarta intrusió salina com a mecanisme significatiu a escala provincial.

L'evolució cap a fàcies mixtes amb clorurs i sulfats suggereix processos complexos d'interacció amb múltiples litologies o influència antròpica significativa, o bé ambdós processos de manera simultània o seqüencial (contacte amb evaporites més influència antròpica). També pot suggerir la circulació profunda a través de formacions litològiques

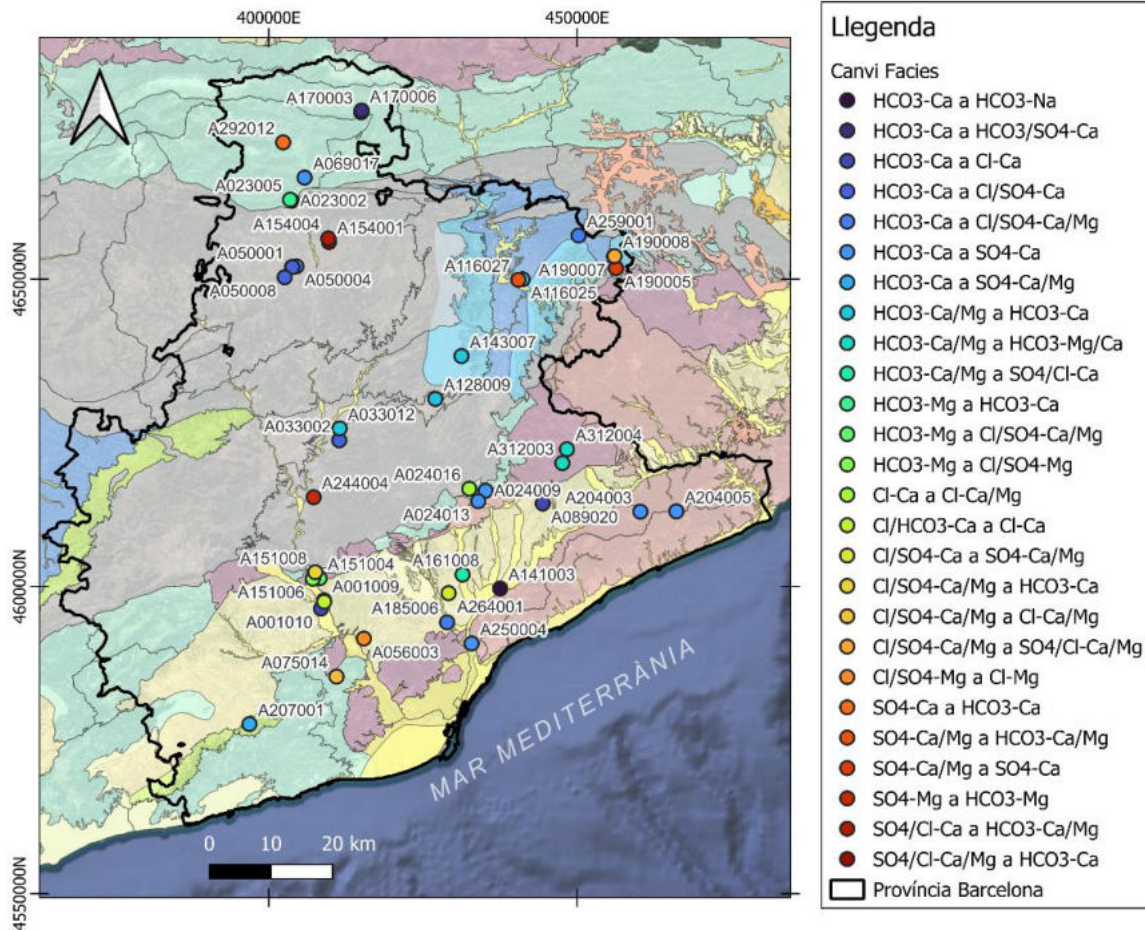


Figura 14: Distribució espacial de les fonts amb canvi de fàcies entre el 2023 i el 2024.

heterogènies. La complexitat composicional reflecteix la complexitat hidrogeològica, on sistemes de flux regional que travessen múltiples unitats litològiques, zones de mescla d'aqüífers amb diferents composicions o àrees on es superposen impactes geològics i antròpics.

Els punts en tons blau clar, turquesa i verd (Figura 14) representen fonts que comencen amb composició bicarbonatada amb presència significativa de magnesi, típica d'àrees amb dolomies ($\text{HCO}_3\text{-Ca/Mg}$). Les seves trajectòries evolutives revelen processos de mescla i dissolució diferencial. Aquelles fonts que evolucionen cap a fàcies més càlciques pures possiblement estan influenciades per dilució o mescla amb aigües que han circulat preferentment per calcites. La calcita (CaCO_3) té una velocitat de dissolució més ràpida que la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), de manera que les aigües de recàrrega recent en seqüències mixtes calcita-dolomita adquireixen inicialment més Ca^{2+} que Mg^{2+} . L'evolució observada suggereix

que les fonts més magnèsiques (fluxos lents en dolomies profundes) es barregen amb fluxos ràpids calcítics (recàrrega recent en calcàries), diluint el magnesi. D'altra banda, el canvi de fàcies bicarbonatada Ca/Mg a Mg/Ca mostra un increment relatiu del magnesi, suggerint una major dissolució de dolomita amb el temps de residència. En etapes inicials de circulació en roques dolomítiques, l'aigua dissol preferentment calcita intersticial o vetes. En augmentar el temps de contacte, la dissolució de dolomita s'intensifica, incrementant Mg^{2+} .

La incorporació de sulfats i clorurs des de fàcies magnèsiques, que produeix una evolució de bicarbonatada a sulfatada/clorurada o clorurada/sulfatada, suggereix trajectòries de flux més llargues que travessen seqüències complexes (dolomies i evaporites) o influència de contaminació en zones dolomítiques. L'aparició d'aquestes fàcies mixtes en zones específiques pot assenyalar estructures geològiques (falles, plecs) que controlen la circulació profunda.

Els punts en tons grocs (Figura 14) representen fonts amb un contingut significatiu de clorurs (Cl-Ca, Cl/HCO₃-Ca), indicant influència prèvia de salinització. Cap al 2024, es reconeix una incorporació de magnesi mantenint el caràcter clorurat (Cl-Ca/Mg), un increment relatiu de clorurs respecte als bicarbonats (Cl/HCO₃-Ca a Cl-Ca) o un canvi cap a un major contingut de sulfats (Cl/SO₄-Ca a SO₄-Ca/Mg). Aquestes evolucions es concentren especialment a la zona sud i sud-est de la província, en àrees costaneres i de plana al·luvial, on hi ha una major densitat de polígons industrials i zones urbanes i, per tant, la influència antròpica és més probable.

La incorporació de magnesi mantenint el component clorurat suggereix que el flux està interactuant amb formacions dolomítiques en profunditat, indicant circulació descendent de contaminació salina cap a nivells més profunds de l'aquífer. L'increment del component clorurat, entre 2023 i 2024, evidencia un agreujament de la salinització. Sota condicions de sequera, la reducció dels fluxos d'aigua dolça que dilueixen les aportacions clorurades concentra aquests contaminants. Aquesta evolució es concentra especialment a la zona sud i sud-est provincial (àrees costaneres, plana al·luvial del Baix Llobregat), coincidint amb major densitat de polígons industrials, zones urbanes i agricultura intensiva.

La transició cap a un major contingut de sulfats pot reflectir la progressió del flux salinitzat cap a zones amb evaporites on s'afegeixen sulfats, o, en contextos agrícoles, l'aplicació combinada de diferents tipus de fertilitzants que aporten tant clorurs com sulfats.

Els punts en tons taronja i vermell (Figura 14) representen fonts que comencen amb un alt contingut en sulfats, ja sigui càlcic o magnèsic. Els canvis cap a fàcies bicarbonatades suggereixen dilució del contingut sulfatat, possiblement per mescla amb aigües més superficials o de recàrrega més recent de fàcies bicarbonatades. En sistemes kàrstics, és habitual que les fonts de flux sulfatat (que ha estat en contacte amb evaporites) es barregin a la zona de descàrrega amb fluxos superficials bicarbonatats, resultant en composicions intermèdies. La direcció de l'evolució (SO₄ → HCO₃) indica que el flux bicarbonatat dilueix el sulfat, suggerint un major cabal relatiu dels fluxos somers.

D'altra banda, també s'observen variacions en les proporcions d'anions mantenint la composició catiònica ($\text{SO}_4\text{-Ca/Mg}$ a $\text{HCO}_3\text{-Ca/Mg}$ i $\text{SO}_4\text{-Ca}$) o variacions més complexes que suggereixen mescla de diferents tipus d'aigua ($\text{SO}_4\text{/Cl-Ca}$ a $\text{HCO}_3\text{-Ca/Mg}$). Aquestes evolucions es distribueixen principalment a zones centrals i més costaneres, associades a contextos geològics complexos (presència d'evaporites terciàries a la depressió central) així com a àrees amb múltiples fonts de contaminació.

Pel que fa a la distribució espacial dels processos evolutius, es distingeixen tres dominis geològics. El primer, zona nord i nord-est (sistema muntanyós pirinenc-prepirinenc), presenta una predominança de canvis des de fàcies bicarbonatades càlciques cap a altres tipus, amb transicions freqüents cap a fàcies sulfatades o clorurades. Aquesta zona mostra la diversitat de trajectòries evolutives, reflectint la heterogeneïtat litològica i la complexitat estructural del territori, amb presència de formacions carbonatades mesozoiques, evaporítiques triàsiques i metamòrfiques paleozoiques. La complexitat estructural (encavalcament, falles) juxtaposa litologies diverses en distàncies curtes, permetent que un mateix flux subterrani travessi seqüències litològiques múltiples i desenvolupi evolucions hidroquímiques complexes. La presència d'evolucions cap a fàcies sòdiques confirma el control del basament silícic en zones específiques.

La zona central presenta una mescla complexa d'evolucions, amb presència significativa de transicions cap a fàcies clorurades i sulfatades. Aquesta àrea, amb major densitat de població i activitat agrícola-ramadera, mostra una clara superposició de processos naturals (contacte amb evaporites terciàries de la conca) i influència antròpica. La incorporació de clorurs i sulfats en fàcies originàriament bicarbonatades és més freqüent que a la zona muntanyosa, evidenciant l'impacte dels retorns de reg (vall del Llobregat mitjà, Anoia, Bages) i el desenvolupament urbà-industrial (eix del Vallès). La heterogeneïtat d'evolucions reflecteix també una heterogeneïtat de pressions, on coexisteixen zones relativament preservades amb zones d'impacte antròpic significatiu.

La zona sud i sud-est (costa) mostra la major concentració d'evolucions des de fàcies bicarbonatades cap a fàcies clorurades o mixtes clorurades-sulfatades. Aquesta zona costanera presenta les trajectòries evolutives més complexes, possiblement relacionades amb múltiples factors no excloents: (1) major pressió antròpica per urbanització densa de l'àrea metropolitana de Barcelona i agricultura intensiva del Baix Llobregat, (2) possible mescla amb aigües de major salinitat en aqüífers costaners, tot i que l'absència d'evolucions clares cap a fàcies clorurades sòdiques descarta intrusió marina, (3) temps de residència més prolongats en aqüífers de la depressió litoral que permeten una major mineralització, i (4) efectes de la sequera més pronunciats en zones de menor recàrrega relativa. L'increment de fàcies clorurades entre 2023 i 2024 és més marcat en aquesta zona, assenyalant-la com una àrea de major vulnerabilitat hidroquímica i major necessitat de monitoratge intensiu.

5.3 Evolució de cabals

L'anàlisi de l'evolució dels cabals a les fonts de la província de Barcelona durant el període 2017-2024 (2016 no disposa de dades) revela patrons temporals significatius que reflecteixen tant la variabilitat climàtica com les característiques hidrogeològiques del territori (Figura 15 i

Figura 16). Els cabals no reflecteixen directament la pluja de cada any, sinó la resposta de cada tipus d'aqüífer segons les seves característiques hidrogeològiques (capacitat d'emmagatzematge, conductivitat hidràulica i connexió amb reserves profundes).

La distribució temporal de cabals mostra una notable variabilitat interanual (Figura 16). Els valors mitjos dels cabals es mantenen consistentment baixos, en el rang de 0,05-0,10 L/s durant tot el període de mostreig, reflectint que la majoria de les fonts monitoritzades corresponen a fonts de baix cabal característiques de fluxos locals o descàrrega difusa. Tot i això, hi ha presència d'abundants valors atípics en tots els anys, amb cabals que superen els 0,5 L/s i, en 16 casos, arriben a 1,0 L/s. D'aquests 16 fonts de major cabal, només dos mantenen cabals persistentment iguals a 1,0 L/s al llarg de tota la sèrie temporal, suggerint fonts principals d'aqüífers regionals amb gran capacitat de regulació (Font de la Boixa (Alpens) i Font del Castell (Sant Julià de Cerdanyola)). Els 14 casos restants corresponen a pics temporals associats a esdeveniments de recàrrega excepcional o a fonts amb comportament més variable segons les condicions climàtiques.

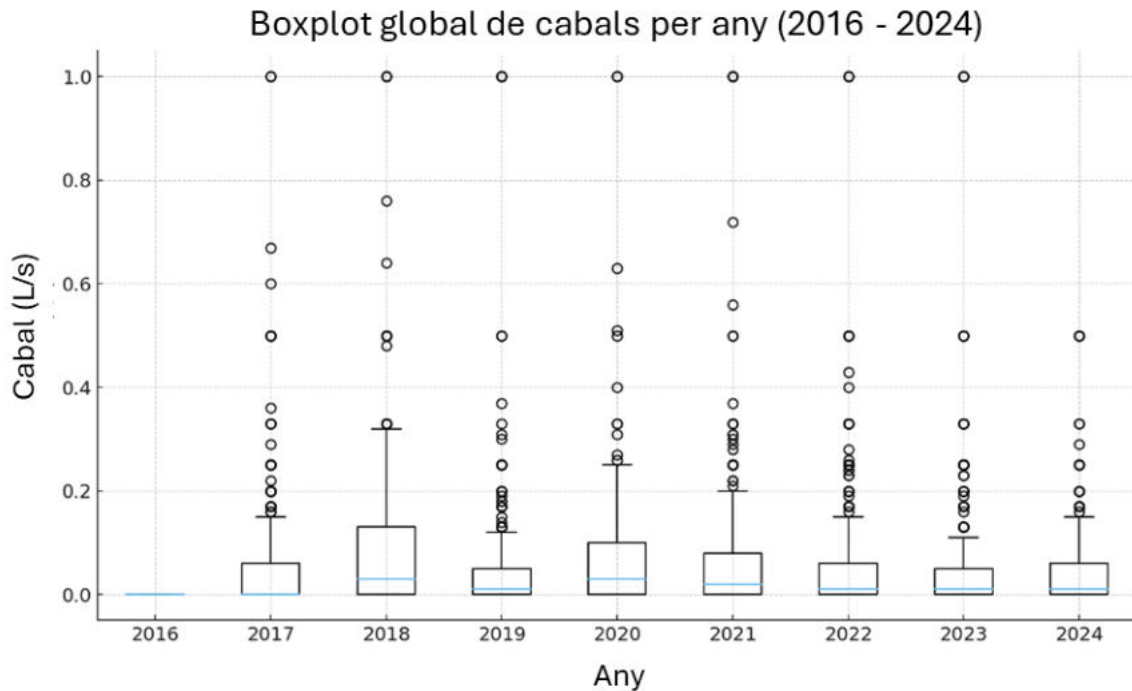


Figura 15: Distribució temporal de cabals entre el 2016 i el 2024 de les fonts estudiades. Notar que durant el 2016 no hi ha dades de cabal.

L'any 2018 destaca per la major dispersió de dades i els valors màxims més elevats, coherent amb les condicions de recàrrega excepcional després de períodes de precipitacions més abundants. En canvi, els anys 2022-2024 mostren una tendència cap a valors lleugerament més baixos i menor dispersió, reflectint l'impacte acumulatiu de la sequera intensa documentada per AEMET durant el període 2021-2023. Aquesta disminució del rang de cabals, des del 2021 fins al 2024, indica que la sequera no només redueix els valors absoluts de cabal, sinó que homogeneïtza el comportament del sistema. Així, durant períodes secs, tant les fonts

normalment productives com els de baix cabal tendeixen a convergir cap a valors mínims, perdent la diferenciació que presenten en condicions normals.

L'anàlisi de la distribució estacional de cabals per any (Figura 16) mostra patrons consistents amb el règim hidrològic mediterrani, però modulats per les condicions hidrogeològiques i l'estat de sequera. En general, s'observa una tendència cap a cabals lleugerament superiors a la primavera, reflectint la recàrrega hivernal dels aquífers després del període de precipitacions màximes (novembre-març en clima mediterrani). Les estacions de tardor i hivern presenten valors similars, mentre que els cabals d'estiu tendeixen a ser els més baixos, resultat del dèficit híbrid acumulat durant els mesos calorosos, amb màxima evapotranspiració i absència de precipitació.

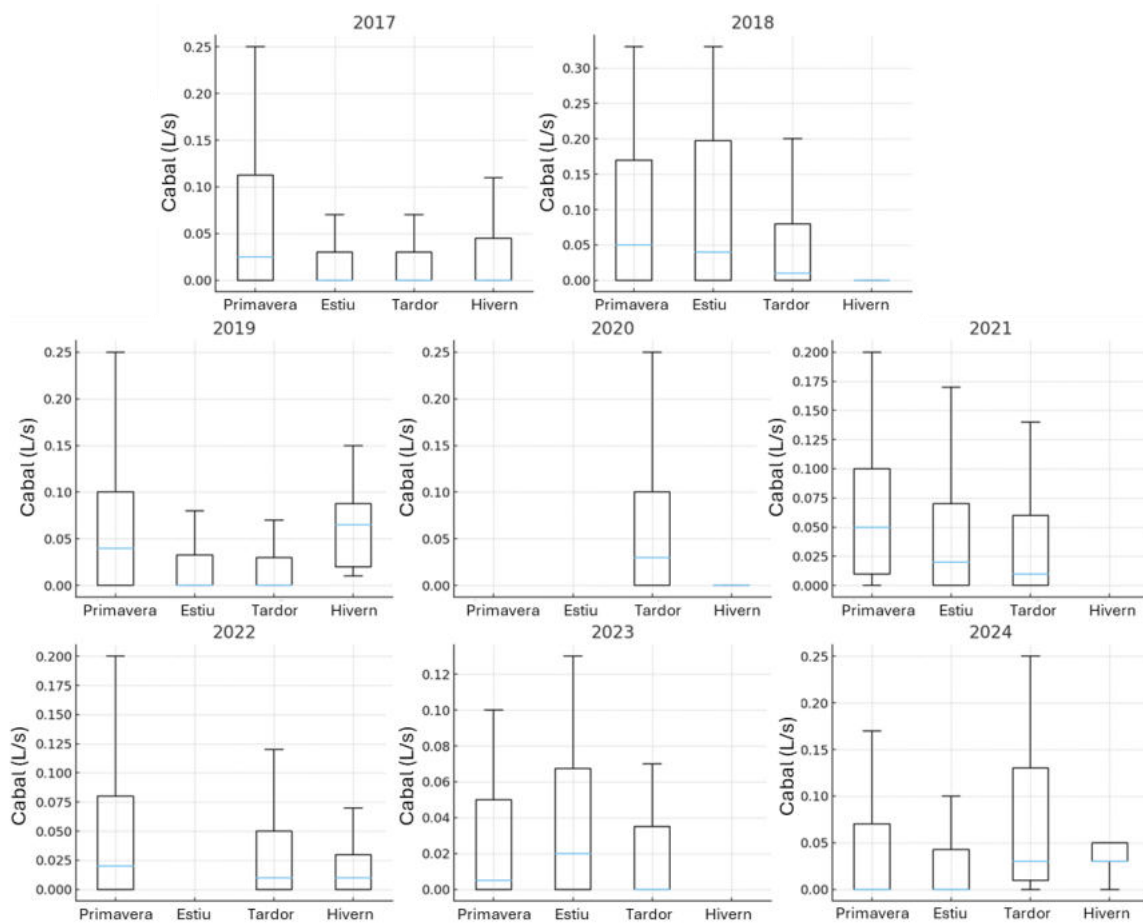


Figura 16: Distribució temporal estacional dels cabals de les fonts estudiades entre el 2017 i el 2024.

Durant el període 2017-2021, la variabilitat estacional es manté relativament moderada i consistent entre anys. Els cabals mostren lleugeres fluctuacions estacionals, tot i que sense un patró sistemàtic clar que diferenciï significativament una estació d'una altra, excepte l'any 2018, que presenta els valors més elevats de tot el conjunt de mostres, a la primavera i a l'estiu. Aquesta relativa homogeneïtat estacional, que pot semblar paradoxal en un clima mediterrani amb marcada estacionalitat de precipitació, podria reflectir tant la diversitat de

tipus d'aqüífers monitoritzats (amb diferents temps de resposta a la recàrrega) com la influència de les condicions climàtiques particulars de cada any, que poden alterar els patrons estacionals típics.

L'anomalia positiva del 2018, associada a esdeveniments extrems de pluges intenses, reflecteix condicions excepcionals de recàrrega durant l'hivern i la primavera de 2018, que van permetre mantenir cabals elevats fins i tot durant l'estació seca. L'any 2020 també mostra valors elevats, associats a l'esdeveniment torrencial Gloria, ocorregut durant el mes de gener d'aquest any, que va generar una recàrrega ràpida i intensa als aquífers amb resposta més directa.

El període 2022-2024, coincidint amb la sequera severa, presenta la menor variabilitat estacional i els cabals més homogèniament baixos de tota la sèrie. La reducció en l'amplitud de les variacions estacionals indica l'esgotament progressiu de les reserves dels aquífers i la disminució de la recàrrega efectiva. Sota condicions de sequera prolongada, fins i tot les precipitacions que es produeixen són majoritàriament consumides pel dèficit d'humitat del sòl i l'evapotranspiració, sense generar una recàrrega efectiva significativa. Particularment el 2023, els boxplots mostren rangs interquartílics molt estrets i medians consistentment baixes en totes les estacions, evidenciant l'impacte sostingut del dèficit pluviomètric, on el sistema ha perdut la seva capacitat de resposta estacional i les fonts comencen a descarregar les reserves residuals de l'aqüífer de manera pràcticament constant, sense aportació de recàrrega que generi fluctuacions.

L'evolució temporal de cabals diferenciada per unitat hidrogeològica (Figura 17) mostra comportaments contrastats segons les característiques hidrodinàmiques dels sistemes aquífers.

Els aquífers en medi porós i fissurat (calcàries i gresos) (línia blau fosc) mostren una gran variabilitat interanual, amb pics notables el 2018, 2020 i 2023. Aquests sistemes presenten una resposta ràpida a esdeveniments de recàrrega, característica típica d'aqüífers carstificats amb alta permeabilitat secundària. Els pics de cabal responen a esdeveniments de precipitació intensa que generen recàrrega ràpida a través de la xarxa de fractures, mentre que la matriu porosa proporciona certa capacitat de regulació. Aquesta sensibilitat a la recàrrega és equivalent a la sensibilitat a la sequera. La pronunciada disminució observada el 2023-2024 evidencia l'anterior, on, un cop esgotades les reserves de les fractures (buidatge ràpid) i de la matriu (buidatge lent), el sistema col·lapsa abruptament.

Els medis de baixa permeabilitat amb aquífers locals en detrítics i margocalcàris (línia taronja) presenten cabals consistentment baixos, però amb notable estabilitat temporal, principalment entre 2021 i 2023. Aquesta estabilitat aparent sota sequera severa suggereix que aquest tipus d'aqüífer, en dependre de fluxos locals en zones de fracturació limitada, té poca capacitat d'emmagatzematge, però també mínima connectivitat amb la superfície, per la qual cosa funcionen amb reserves profundes de renovació molt lenta. El pic el 2020 suggereix una resposta retardada a l'esdeveniment torrencial de la Gloria d'aquell any. En sistemes de baixa permeabilitat, la recàrrega no genera una resposta immediata, sinó que triga mesos a propagar-se cap a les zones de descàrrega. De fet, el temporal de la Gloria va ocórrer

al gener de 2020, però els pics de cabal es van veure reflectits a la tardor de 2020 (setembre a novembre 2020). Aquests sistemes, en dependre de fluxos locals en zones de fracturació, són menys sensibles a variacions climàtiques de curt termini, però també tenen menor capacitat de recuperació.

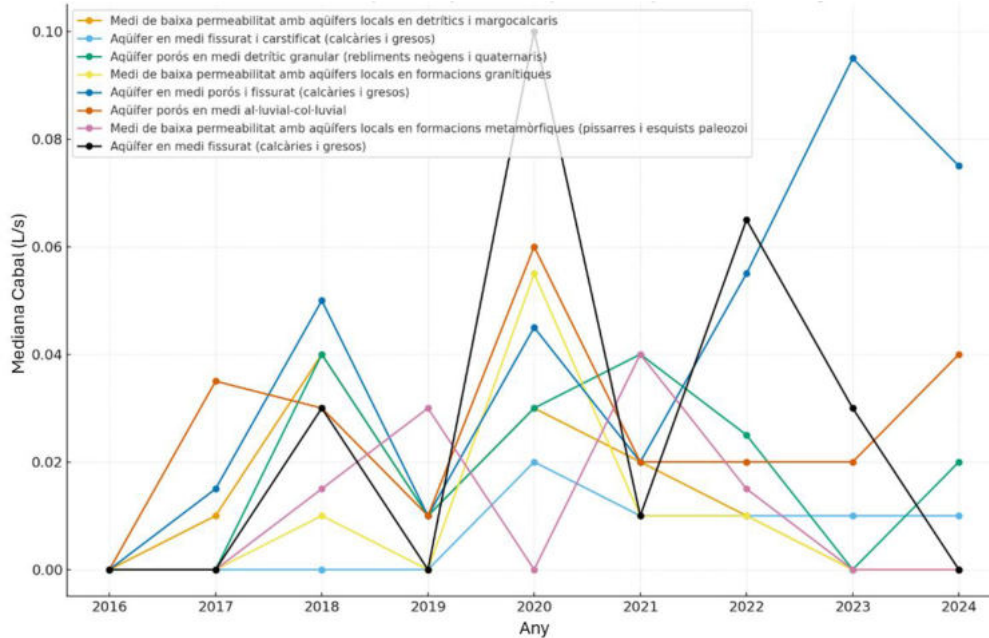


Figura 17: Evolució temporal del cabal de les fonts estudiades, per unitat hidrogeològica.

Els aquífers porosos en medi detrític granular (línia verda) mostren un comportament intermedi, amb valors moderats i variabilitat relativament estable fins al 2021, seguida d'un descens progressiu cap al 2024. Aquesta tendència reflecteix l'esgotament gradual de les reserves emmagatzemades en els medis porosos davant del dèficit de recàrrega sostingut. Durant els primers anys de sequera, mantenen cabals raonables descarregant reserves emmagatzemades en la porositat efectiva del medi granular. Tot i això, en ser sistemes amb bona connectivitat hidràulica, però sense recàrrega efectiva, les reserves s'esgoten gradualment mitjançant el descens progressiu del nivell freàtic. El descens és més suau que en sistemes fissurats (no hi ha un col·lapse abrupte) però més pronunciat que en sistemes de baixa permeabilitat (tenen una major productivitat inicial).

Els aquífers porosos en medi al·luvial-col·luvial (línia vermell-taronja) presenten valors baixos i estables durant tot el període, amb un lleuger increment el 2024. Aquests sistemes, ubicats en valls i depressions, poden estar rebent aportacions laterals de formacions adjacents o beneficiant-se de connexió amb cursos superficials. Durant un període de sequera, quan descendeixen els nivells freàtics regionals, alguns aquífers al·luvials poden actuar com a receptors que capturen fluxos laterals de sistemes circumdants, mantenint o fins i tot incrementant els seus cabals de descàrrega mentre l'entorn s'esgota. Aquest comportament

els converteix en zones crítiques durant la sequera: poden mantenir fonts quan la resta del sistema falla.

Els medis de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions granítiques (línia groga), els medis de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions metamòrfiques (línia rosa) i en medi fissurat i carstificat (línia cian) mostren cabals molt baixos i relativament estables, amb mínima resposta a les variacions climàtiques interanuals, evidenciant el seu caràcter de sistemes locals de flux limitat, on la descàrrega depèn gairebé exclusivament de reserves profundes amb temps de renovació de dècades. La seva estabilitat sota sequera no indica abundància de recurs sinó desconexió efectiva amb el cicle climàtic de curt termini. Són sistemes de menor productivitat, però major inèrcia, on pràcticament no existeix resposta a seques de pocs anys, però tampoc es recuperen ràpidament després d'aquestes.

L'anàlisi de tendències mitjançant la pendent de Sen i el test de Mann-Kendall (Figura 18) revela una distribució espacial heterogènia dels comportaments evolutius dels cabals, però amb una predominança clara de fonts amb cabal estable en el temps, durant el període d'anàlisi. Aquesta estabilitat suggereix que, malgrat les condicions de sequera del període 2021-2023, molts sistemes aqüífers han mantingut cabals relativament constants, possiblement degut a la seva inèrcia hidrogeològica o a l'existència de reserves profundes que amorteixen les variacions climàtiques de curt termini. Aquesta inèrcia pot ser deguda a grans reserves profundes, temps de residència prolongats o àrees de recàrrega extenses que dilueixen l'impacte de dèficits localitzats.

Els punts amb ascens moderat (cian) i descens moderat (taronja) apareixen en proporcions similars, distribuïts de forma dispersa per tota la província sense un patró espacial clarament definit. Aquesta distribució heterogènia reflecteix la complexitat de factors locals que controlen la resposta de cada font (tipus d'aqüífer, profunditat de circulació, àrea de recàrrega, grau de confinament i possible influència d'extraccions a l'entorn), més que no pas factors climàtics regionals.

Els punts amb tendències fortes (ascens fort en blau fosc i descens fort en marró) són menys freqüents, però apareixen en proporcions similars entre si, distribuïts de manera puntual pel territori, tot i que les fonts amb descens fort són més nombroses. És particularment notable la concentració d'aquests punts de descens en determinades zones de l'interior, especialment en àrees muntanyoses i de capçalera de conques. Aquestes fonts, associades típicament a sistemes càrstics somers o aqüífers locals de petita extensió, depenen directament de la recàrrega per precipitació i manquen de connexió amb reserves profundes que esmorteixin el dèficit. La seva alta sensibilitat les converteix en indicadors primers d'estrès hídric, ja que són les primeres a col·lapsar sota sequera i les primeres a recuperar-se després d'esdeveniments de recàrrega.

En canvi, les fonts blau fosc (ascens fort), tot i ser escasses, es distribueixen de forma dispersa però consistent pel territori. Aquests casos particulars mereixen atenció especial, ja que són menys intuïtius en un context de sequera, i podrien indicar canvis en les condicions de drenatge local, mobilització de reserves profundes prèviament no actives o efectes de gestió com la reducció de bombeigs a l'entorn que afavoreix la surgència natural.

L'absència de patrons espacials clars (no hi ha zones geogràfiques amb comportament homogeni; les fonts amb tendències oposades poden estar properes entre si o d'agrupaments geogràfics d'un tipus específic de tendència suggereix que els factors locals (característiques hidrogeològiques particulars de cada sistema) tenen més pes que els factors regionals (clima, relleu general) en la determinació de l'evolució dels cabals. Dos fonts separades per pocs quilòmetres poden presentar evolucions completament diferents si pertanyen a sistemes aquífers amb característiques hidrogeològiques diferents. Aquesta heterogeneïtat espacial indica que la resposta de les fonts a les condicions climàtiques adverses és altament variable i específica de cada lloc. L'anterior té implicacions crítiques per a la gestió, ja que no és possible extrapolar el comportament d'una fonts a les seves veïnes; cada font requereix una avaluació individual de la seva resposta a l'estrès climàtic.

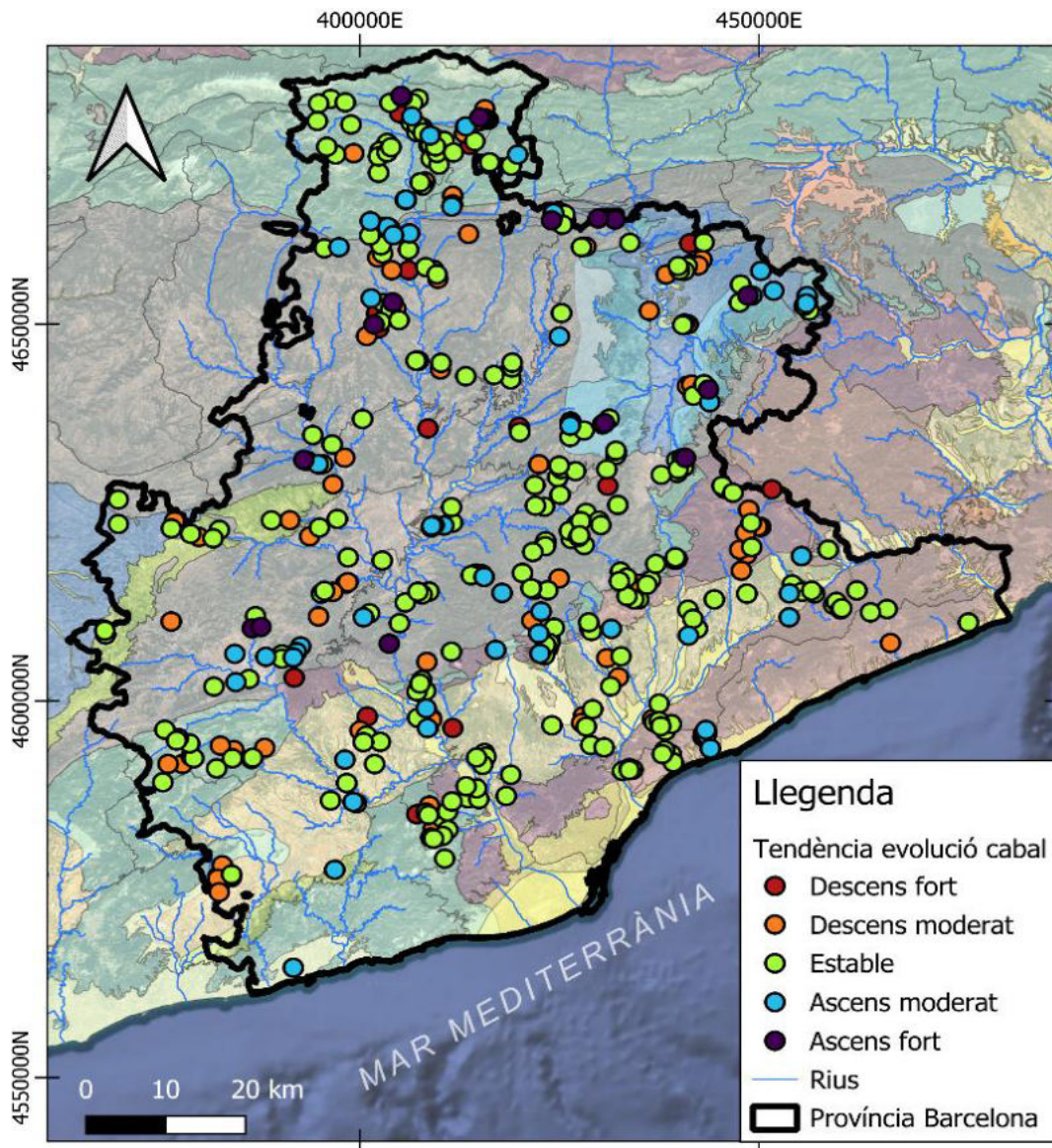


Figura 18: Distribució espacial de la tendència d'evolució del cabal, entre els anys estudiats (2016-2024).

5.3.1.1 Conclusió

L'anàlisi de l'evolució de cabals proporciona tres idees fonamentals sobre la resposta del sistema hidrogeològic a l'estrès climàtic:

1. Existeix una jerarquia de vulnerabilitat hidrogeològica davant la sequera: Les dades mostren una gradació de vulnerabilitat segons el tipus d'aqüífer: (més vulnerable) sistemes càrstics i fissurats amb resposta ràpida → aquífers porosos detrítics amb descàrrega gradual → sistemes de baixa permeabilitat amb alta inèrcia (menys vulnerable). Aquesta jerarquia no és arbitrària, sinó que reflecteix principis hidrodinàmics fonamentals, on la vulnerabilitat és directament proporcional a la connectivitat hidràulica i a la taxa de renovació. Els sistemes més productius en condicions normals (carst, fissurats) són paradoxalment els més vulnerables sota sequera perquè la seva alta connectivitat que facilita recàrrega ràpida també facilita buidatge ràpid. En canvi, els sistemes de baixa productivitat (baixa permeabilitat) mantenen cabals mínims però estables perquè la seva escassa connectivitat que limita la recàrrega també limita la descàrrega. Aquesta jerarquia ha d'informar les estratègies de gestió: durant la sequera, prioritzar el monitoratge i protecció de sistemes càrstics/fissurats (alta vulnerabilitat, recursos importants), mentre que els sistemes de baixa permeabilitat requereixen menor vigilància immediata, però planificació a llarg termini per la seva lenta recuperació.
2. La pèrdua de l'amplitud estacional del cabal com a indicador de col·lapse del sistema: La disminució progressiva de la variabilitat estacional durant 2022-2024, culminant amb la homogeneïtat del 2023, és un senyal d'alarma hidrogeològica. En condicions normals, els aquífers funcionen com a sistemes dinàmics que responen estacionalment, on reben recàrrega durant les èpoques de pluja, l'emmagatzemen i la descarreguen gradualment al llarg de l'any. La pèrdua d'aquest senyal estacional indica la transició des del funcionament normal (recàrrega-emmagatzematge-descàrrega) cap a un mode d'emergència (només descàrrega de reserves sense reposició). La recuperació des d'aquest estat requereix el retorn de precipitacions normals i diversos anys de recàrrega excedentària per reposar les reserves esgotades. Els cabals de 2024, tot i estar encara deprimits, comencen a mostrar una lleugera recuperació de l'amplitud estacional, suggerint l'inici d'una fase de recuperació després de les precipitacions de finals de 2023 i principis de 2024.
3. Existeix un control local per sobre del control regional amb implicacions per a la gestió: L'absència de patrons espacials coherents en les tendències de cabal (heterogeneïtat a escala de quilòmetres) demostra que les característiques hidrogeològiques locals específiques de cada font tenen més pes que els factors climàtics regionals a l'hora de determinar la resposta a la sequera. Aquesta escala de control té implicacions crítiques per a la gestió, ja que no és possible desenvolupar polítiques de gestió uniformes a escala provincial, sinó que es requereix una aproximació cas per cas. En aquest sentit, la xarxa de monitoratge ha de dissenyar-se considerant la diversitat de tipus d'aqüífer i no només una cobertura geogràfica uniforme. D'altra banda, la identificació de fonts amb comportament anòmal (ascensos durant la sequera, estabilitat excepcional) és prioritària perquè assenyalen sistemes amb propietats hidrogeològiques particulars que poden ser crítics

com a reserves estratègiques durant futures sequeres. La planificació davant el canvi climàtic ha de considerar que la resposta del sistema hidrogeològic provincial serà heterogènia, és a dir, en algunes zones hi haurà col·lapse del sistema hidrogeològic, mentre que altres mantindran recursos, requerint estratègies diferenciades d'adaptació segons la vulnerabilitat local específica.

5.4 Anàlisi de pressions antròpiques

L'anàlisi de les pressions antròpiques sobre les fonts de la província pretén revelar com el sistema hidrogeològic respon a estrès múltiple davant pressions antropogèniques (agricultura, ramaderia, indústria, urbanització) superposades a l'estrès climàtic (sequera 2021-2024). Aquesta superposició té un comportament sinèrgic, on la sequera intensifica l'impacte de la contaminació mitjançant dos mecanismes no excloents: (1) reducció dels fluxos naturals que normalment dilueixen contaminants, i (2) sobreexplotació d'aqüífers per compensar el dèficit superficial, que mobilitza contaminants acumulats i modifica els patrons de flux.

La metodologia integra l'anàlisi espacial de les pressions (explotacions agrícoles, ramaderes, industrials i abocaments urbans; Figura 19) amb l'evolució temporal de paràmetres hidroquímics (temperatura, conductivitat elèctrica, pH, nitrats, amoni) i cabal durant 2016-2024. Es van identificar fonts mitjançant dos criteris: (1) canvi de fàcies hidroquímica entre 2023 i 2024 no explicable per evolució natural, i (2) fàcies no concordant amb la litologia local, suggerint influència antròpica.

De 578 fonts monitoritzades, es van identificar 43 (7,4% del total) amb influència antròpica significativa, corresponents a 54 mostres (Figura 20). Cal tenir en compte que la xarxa de monitoratge de la Diputació de Barcelona està dissenyada per cobrir la diversitat hidrogeològica, no per detectar sistemàticament contaminació, de manera que inclou moltes fonts en zones remotes sense pressió antròpica. La proporció real de fonts afectades en zones amb activitat agrícola/ramadera/industrial intensiva és significativament superior.

Així, es van estudiar diferents patrons de contaminació i els seus respectius senyals hidroquímics: (1) Contaminació agrícola i ramadera, amb nitrats com a traçador ubic, i (2) Contaminació industrial i urbana, amb senyals químics diferenciats.

La contaminació per activitats agrícoles i ramaderes constitueix la pressió antròpica més estesa territorialment a la província, manifestant-se principalment mitjançant nitrats (NO_3^-) com a indicador diagnòstic. Els nitrats provenen de fertilitzants nitrogenats (agricultura) i purins (ramaderia), infiltrant-se cap als aqüífers on el seu comportament és conservatiu sota condicions oxidants (no es degrada, només es dilueix o es transporta) (Mas-Pla i Menció, 2019).

Així, es van identificar tres patrons temporals diferenciats, a través de l'anàlisi de gràfiques d'evolució de nitrats a les fonts estudiades:

1. Contaminació crònica estable: Hi ha fonts que mantenen concentracions elevades (freqüentment >50 mg/L, superant el límit de potabilitat i de qualitat ambiental) de manera consistent durant anys. Exemples: Font de Can Companyà (Castellbisbal) i Font del Xalet (Bigues i Riells del Fai). Aquest patró indica pressió contínua sense mesures de mitigació. Hidrogeològicament, suggereix aquífers amb temps de residència prolongat on el contaminant s'acumula i s'homogeneïtza.

2. Contaminació progressiva: Fonts que mostren un increment gradual de concentracions al llarg del temps. Exemple: Font del Ciment (Sant Vicenç de Castellet). Aquest patró és hidrogeològicament crític perquè indica increment a l'aquífer. La càrrega d'entrada supera la capacitat de descàrrega/dilució, de manera que el sistema es degrada progressivament. En aquífers amb baixa taxa de renovació, aquest procés pot continuar durant dècades després del cessament de la font contaminant. La detecció de tendències ascendents és un senyal d'alarma que requereix intervenció urgent abans que la contaminació assoleixi nivells irreversibles.

3. Episodis de contaminació: Pics puntuals seguits de recuperació parcial. Exemple: Font de l'Alzina (Santa Coloma de Gramenet). Aquest patró reflecteix esdeveniments específics (aplicació massiva de fertilitzants durant el període de sembra, rentat de sòls després de pluges intenses que mobilitzen nitrats acumulats superficialment) en sistemes de renovació ràpida. La recuperació post-pic indica alta taxa de flux que dilueix i exporta el contaminant. Aquests sistemes, tot i ser vulnerables a impulsos de contaminació, tenen una major capacitat de recuperació que els sistemes amb contaminació crònica.

Secundàriament als nitrats, la contaminació agrícola-ramadera es manifesta mitjançant:

1. Increment de clorurs (Cl^-): Indicador de purins (rics en NaCl per la fisiologia animal) o retorns de reg amb sals acumulades per evapotranspiració. El clorur és també conservatiu sota condicions naturals, funcionant com a traçador persistent.
2. Augment de la conductivitat elèctrica: Reflecteix mineralització total elevada per múltiples sals (nitrats, clorurs, sulfats). Augments graduals (desenes de $\mu S/cm/any$) indiquen acumulació lenta; augments bruscos (>100 $\mu S/cm$ en mesos) assenyalen esdeveniments puntuals de contaminació.
3. Presència d'amoni (NH_4^+): Indicador de contaminació molt recent (purins frescos) o condicions reductores on els nitrats es redueixen a amoni. La seva detecció, tot i ser puntual en aquest estudi, és crítica perquè confirma l'origen fecal i suggereix condicions anòxiques favorables a la mobilització d'altres contaminants (metalls, arsènic).
4. Contaminació microbiològica (coliforms): Confirma connexió directa amb fonts de contaminació fecal, indicant vulnerabilitat extrema del sistema (infiltració ràpida sense filtració efectiva per zona no saturada).

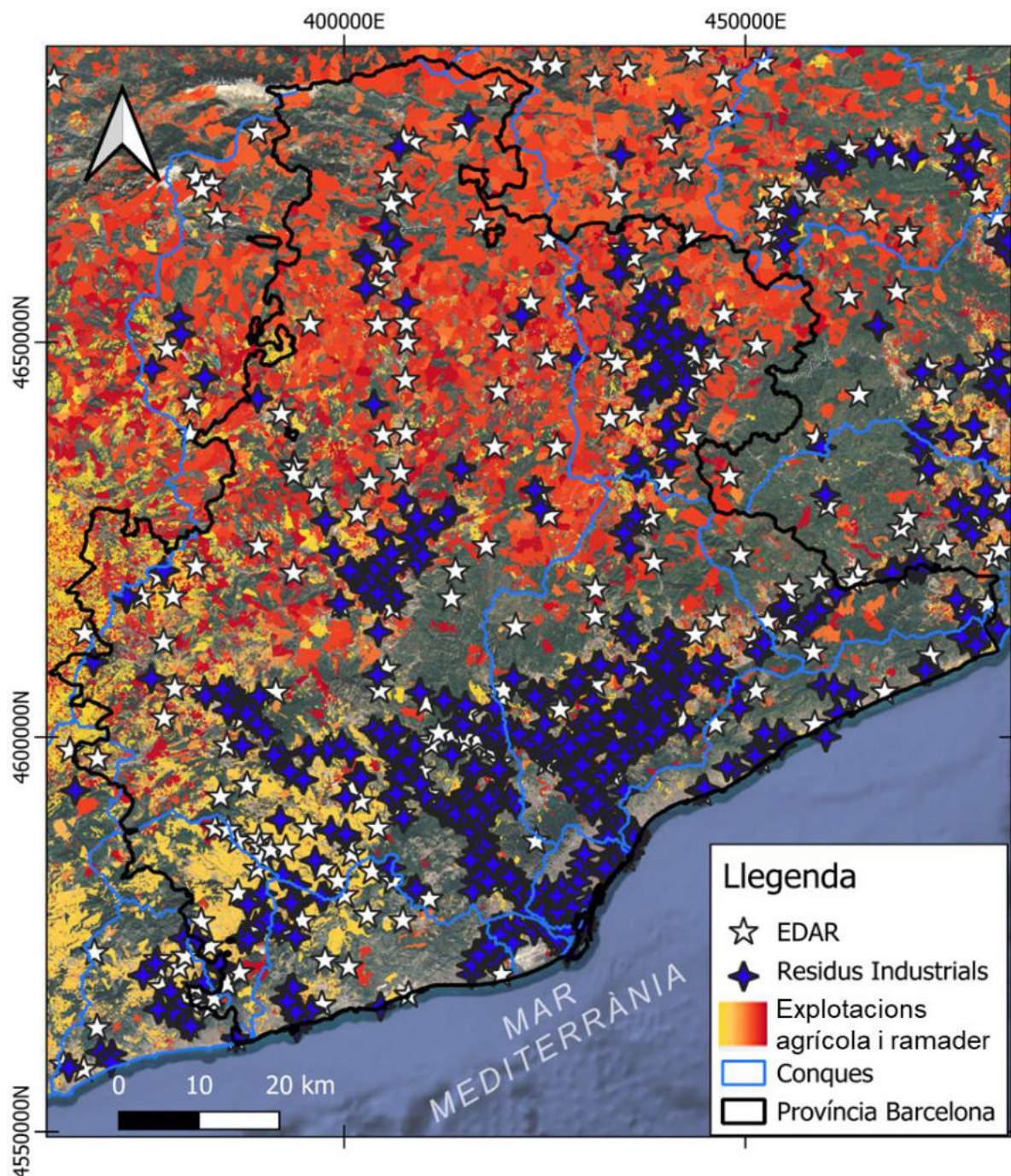


Figura 19: Mapa de pressions antròpiques de la província de Barcelona.

D'altra banda, les pressions industrials i urbanes presenten senyals hidroquímics diferents, tot i que poden superposar-se amb contaminació agrícola-ramadera en àrees periurbanes.

La contaminació industrial es manifesta mitjançant C.E. elevada amb fàcies específiques segons el tipus d'indústria. Per exemple, la influència històrica de les mines de sal de Cardona a la conca alta del Llobregat genera fàcies clorurades amb conductivitat extremadament

elevada que es propaga aigües avall per infiltració de lixiviats salins cap als aqüífers al·luvials connectats amb el curs fluvial. La Font de la Mina (Masquefa) exemplifica aquest cas: fàcies clorurada/bicarbonatada càlcica/sòdica el 2024, amb augment de cabal (paradoxal durant la sequera) explicable per connexió amb fluxos del riu Llobregat afectats per salmorres històriques, i conductivitat elevada constant sense nitrats. L'absència de nitrats descarta origen agrícola/ramader, mentre que la signatura Na-Cl assenyala inequívocament una font salina.

La contaminació urbana (EDAR i xarxes de sanejament), en canvi, s'identifica per la combinació d'indicadors: clorurs elevats (ús domèstic de sal), nitrats (per oxidació de compostos nitrogenats orgànics), amoni (en casos d'abocaments sense tractament complet) i contaminació microbiològica. La proximitat espacial a estacions depuradores o àrees urbanes denses correlaciona amb el deteriorament de la qualitat.

Quant a altres impactes antròpics, un patró particularment crític detectat és el col·lapse funcional per sobreexplotació combinada amb contaminació. La Font del Xalet (Bigues i Riells del Fai) exemplifica aquest procés. El 2023 presentava fàcies $\text{HCO}_3/\text{Cl-Ca/Mg}$ amb conductivitat elevada (1200 $\mu\text{S/cm}$), cabal 0,5 L/s i nitrats moderats. El 2024 passa a fàcies $\text{HCO}_3/\text{Cl-Ca/Na}$, conductivitat reduïda (900 $\mu\text{S/cm}$), cabal zero i nitrats disminuïts a 5 mg/L.

5.4.1 Hidrogeologia i pressions antròpiques

La interpretació hidrogeològica és reveladora, ja que la sobreexplotació de l'aqüífer per bombejos agrícoles i ramaders aigües amunt va provocar un descens piezomètric progressiu fins a desconnectar completament el flux cap a la font (cabal = 0). La fàcies prèvia $\text{HCO}_3/\text{Cl-Ca/Mg}$ amb alta C.E. reflectia contaminació activa per purins/fertilitzants transportats pel flux regional. Després de col·lapsar el cabal, l'aigua residual a la zona de surgència queda estancada, sotmesa a processos d'evolució química prolongada: intercanvi catiònic en argiles (reemplaçament de Ca^{2+} per Na^+ , explicant el canvi a fàcies Na) i dilució/precipitació que redueix la C.E. i els NO_3^- . Aquest canvi hidroquímic no representa una millora sinó una degradació terminal, ja que el sistema ha deixat de funcionar com a aqüífer actiu. Aquest cas constitueix un exemple extrem de sinergia entre sobreexplotació i sequera, on ambdues pressions convergeixen per col·lapsar sistemes vulnerables.

Segons el tipus d'aqüífer, s'identifiquen diferents pressions antròpiques i efectes en la composició química de l'aigua de les fonts analitzades i, més encara, es pot avaluar la vulnerabilitat de cadascun d'ells.

Aqüífers porosos en medis al·luvial-col·luvials

Els aqüífers porosos en medis al·luvials-col·luvials mostren la major vulnerabilitat a contaminació difusa per tres factors: (1) l'alta permeabilitat que facilita infiltració ràpida, (2) la connexió directa amb la superfície per ser un tipus d'aqüífer lliure, i (3) la ubicació en valls amb concentració d'activitats agrícoles, ramaderes i industrials.

Es van identificar múltiples fonts amb deteriorament sever:

1. Augments dràstics de conductivitat (~1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre 2023-2024): Font de Boada Vell (Palau-solità i Plegamans). Augments d'aquesta magnitud en un període tan curt no s'expliquen per evolució natural, sinó per incorporació massiva de sals, associades a intensificació d'abocaments (purins, lixiviats industrials), retorns de reg amb sals concentrades o influència d'EDAR.
2. Contaminació per amoni amb fàcies atípiques: Font Santa (Abrera). Presenta fàcies bicarbonatades càlciques/sòdiques mixtes en anions, amb baix o nul contingut en nitrats però amoni detectable. Aquesta combinació (NH_4^+ present, NO_3^- absent) indica condicions reductores on els nitrats infiltrats s'han reduït a amoni. Hidrogeològicament, suggereix un aqüífer amb zones anòxiques per alt contingut en matèria orgànica (purins), condició que afavoreix processos com la mobilització de metalls i altres compostos tòxics.

La vulnerabilitat d'aquests sistemes s'explica per la seva posició i geometria hidrogeològica, on funcionen com a receptors finals de fluxos superficials i subsuperficials, acumulant tot contaminant mobilitzat a les conques aigües amunt.

Aqüífers porosos en medis detrítics granulars

Els aqüífers porosos en medis detrítics granulats presenten respostes heterogènies que reflecteixen complexitat estructural (multicapa, anisotropia) i diversitat de connexions amb fonts contaminants.

1. Anomalies de cabal associades a contaminació: Font de la Mina (Masquefa; ja discutida anteriorment) mostra augment de cabal durant la sequera combinat amb fàcies clorurada constant. Revela connexió hidrogeològica particular amb fonts externes (riu Llobregat afectat per les mines de sal).
2. Contaminació crònica estable: Font del Refugi (Castellar del Vallès). Manté fàcies bicarbonatada/sulfatada càlcica, cabal constant, conductivitat constant i nitrats persistents en 100 mg/L (duplica el límit de potabilitat). Aquesta estabilitat temporal indica que l'aqüífer ha assolit un estat d'equilibri contaminat: la font de nitrats (agricultura circumdant) aporta càrrega constant que iguala la descàrrega. L'absència de tendència (ni millora ni empitjorament) suggereix contaminació establerta des de fa anys o dècades.
3. Comportament irregular amb senyals de pressió creixent: Fonts dels Horts de les Bassetes (Castellar del Vallès). Fàcies clorurada/bicarbonatada càlcica, amb pics de cabal irregulars (2017, 2021) seguits d'estabilització (2023-2024), però amb augment sostingut de conductivitat (1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el 2017 \rightarrow 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el 2024) i nitrats (constants 100 mg/L fins al 2023, salt a 130 mg/L el 2024), amb presència puntual d'amoni (2022). Aquesta evolució indica pressió ramadera progressiva: l'increment gradual de CE reflecteix acumulació de sals, el salt de nitrats el 2024 assenyala possible intensificació recent d'activitat ramadera, i l'amoni detectat el 2022 confirma infiltració de purins frescos.

Medi amb baixa permeabilitat amb aqüífers locals

Els medis de baixa permeabilitat (detrítics i margocalcaris, metamòrfics, granítics), tot i ser menys productius, no són immunes a l'impacte antròpic. La seva baixa permeabilitat els

protegeix de contaminació difusa generalitzada, però quan sobre ells s'ubiquen zones d'activitat intensa o amb fracturació preferencial, poden contaminar-se de manera severa.

1. Formacions detrítiques i margocalcàries: Mostren variacions irregulars de conductivitat (generalment $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$) amb contaminació generalitzada en clorurs, nitrats i amoni. Exemples: Font Forriola a Sant Feliu Sasserra (fàcies sulfatada càlcica), Font del Tuxot a Casserres (fàcies bicarbonatada sòdica, anòmala per a la litologia). La presència de fàcies sòdiques en context detrític pot reflectir tant intercanvi catiònic intens per alt contingut argilós com infiltració d'aigües residuals urbanes amb alta càrrega de sodi.
2. Formacions metamòrfiques: Deteriorament progressiu amb augment de la conductivitat i dels nitrats. Exemples: Font de Sant Roc a Santa Coloma de Gramenet (bicarbonatada/clorurada càlcica), Font de la Bota a Santa Coloma de Gramenet (bicarbonatada/sulfatada càlcica/sòdica). L'aparició del component sulfatat pot relacionar-se amb fertilitzants sulfatats o, en menor mesura, amb l'oxidació de sulfurs metàl·lics presents en certes roques metamòrfiques.
3. Formacions granítiques: Presenten casos de contaminació activa i casos de recuperació, reflectint possiblement canvis en la gestió local. La Font del Pont a Montseny (bicarbonatada/clorurada càlcica/magnèsica) mostra contaminació ramadera activa, evidenciada en clorurs i nitrats elevats amb relació Na/Cl indicativa de purins. La Font del Pujol a Montseny (bicarbonatada sòdica/càlcica) mostra recuperació: descens de nitrats i canvi en la relació Na/Ca suggereixen cessament o reducció de la pressió ramadera amb progressiva dilució per aigua neta.

Una cosa que es pot observar d'aquests sistemes és que la baixa permeabilitat primària no garanteix protecció. Les zones de fracturació poden funcionar com a vies ràpides de contaminació, i un cop contaminades, la seva lenta renovació dificulta la recuperació.

5.4.2 Correspondència amb l'estat de qualitat de masses d'aigua subterrània (ACA)

La comparació entre les fonts contaminades identificades i la classificació oficial de masses d'aigua subterrània de l'ACA (2021) revela una correspondència general, però discrepàncies crítiques que requereixen atenció (Figura 20).

En aquesta, les fonts van ser classificades com a Concordants o No Concordants respecte a la litologia del lloc d'aflorament de la font, tenint en compte l'anàlisi temporal d'altres paràmetres fisicoquímics i hidrològics, per determinar si les seves característiques químiques responen a processos naturals, a la resposta a la sequera o, bé, a pressions antropogèniques de contaminació.

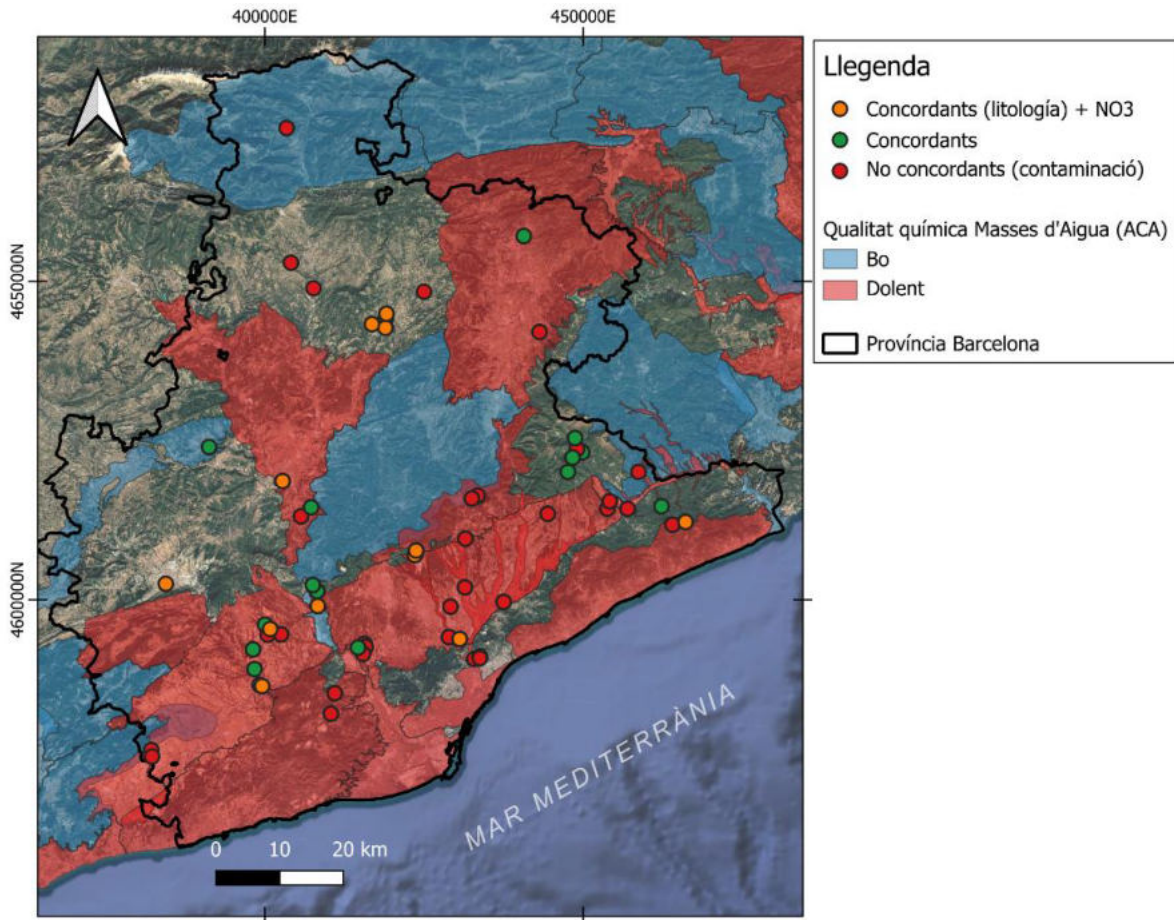


Figura 20: Distribució espacial de les fonts amb canvis de fàcies entre 2023 i 2024 i/o contaminació

L'avaluació de paràmetres a les fonts de la província de Barcelona respecte dels llindars establerts per l'ACA (2021) per a cada massa d'aigua, es resumeix a la Taula 7.

La majoria de fonts contaminades (No Concordants o Concordants + NO_3^-) s'ubiquen en masses classificades com a mal estat químic, validant la classificació oficial. Totes les masses en mal estat presenten fonts amb concentracions elevades de nitrats, independentment que altres paràmetres excedeixin els llindars. Exemples: MAS16, MAS19, MAS22. Aquesta correspondència confirma que el disseny de la xarxa de seguiment de l'ACA i els seus llindars capturen adequadament l'estat químic general en zones de pressió elevada coneguda.

Les zones de mal estat químic es concentren en:

1. Depressió Central i Prelitoral: Agricultura i ramaderia intenses (MAS10, MAS11, MAS12, MAS16, MAS17)
2. Àrees periurbanes i industrials: Zona metropolitana de Barcelona (MAS17, MAS22, MAS38, MAS39)

3. Serralada Litoral costanera: Pressió urbana i agrícola (MAS18, MAS23)

Tanmateix, quatre masses classificades com a bon estat químic (MAS05, MAS69, MAS20, MAS13) presenten fonts amb paràmetres que excedeixen els valors límit de l'ACA (Taula 7, Figures 21 a 28). Aquestes discrepàncies no són errors, sinó senyals que requereixen interpretació diferenciada.

Taula 7: Resum de resultats comparatius entre els paràmetres de les fonts estudiades i els líndars establerts per l'ACA (2021) per a aquests paràmetres, segons la massa d'aigua.

Massa d'aigua	Qualitat química (ACA, 2021)	Nº fonts	Nº mostres	Nº d'excedències
MAS05	Bo	58	198	59
MAS17	Dolent	15	63	19
MAS10	Dolent	32	112	15
MAS12	Dolent	15	49	15
MAS23	Dolent	8	21	11
MAS11	Dolent	8	48	4
MAS69	Bo	30	157	4
MAS20	Bo	2	5	3
MAS13	Bo	1	3	2
MAS16	Dolent	3	21	0
MAS19	Dolent	7	35	0
MAS22	Dolent	11	23	0
MAS34	Dolent	3	9	0
MAS37	Bo	5	13	0
MAS38	Dolent	1	2	0
MAS70	Bo	4	14	0

La MAS05 presenta 59 excedències en conductivitat elèctrica, bor (B) i sulfats (SO_4^{2-}), la xifra més alta entre les masses classificades com a bon estat. L'anàlisi detallada de les relacions iòniques revela que aquestes excedències responen principalment a control litològic, no a contaminació antròpica.

La zona presenta formacions evaporítiques (guixos triàsics, possiblement sals) que imprimeixen naturalment conductivitat elevada i altes concentracions de SO_4^{2-} i B (element traça associat a evaporites) a l'aigua subterrània. Les relacions iòniques B/Cl i SO_4/Cl de les fonts de MAS05 són consistents amb dissolució d'evaporites, no amb contaminació industrial (que generaria relacions diferents).

En aquest sentit, els líndars definits per l'ACA per a MAS05 són excessivament restrictius per a un sistema naturalment mineralitzat. La classificació com a «bon estat» és correcta; el que cal revisar són els líndars. Es recomana redefinir els valors límit considerant la geoquímica natural de fons del sistema, establint líndars més elevats per a CE, SO_4^{2-} i B en aquesta massa específica. Sense aquesta correcció, la classificació futura podria degradar artificialment a «mal estat» un sistema que manté la seva composició natural.

A diferència de MAS05, les fonts de MAS20 que superen els límits de conductivitat i B presenten relacions iòniques B/Cl indicatives de contaminació antròpica, no de control litològic. El bor en aquest context prové probablement de detergents (perborats) en aigües residuals o de fertilitzants enriquits amb bor. Així, MAS20 està experimentant un deteriorament localitzat no captat per la xarxa oficial de l'ACA. La contaminació és incipient (detectada en fonts puntuals, no generalitzada), però la tendència és preocupant. Aquesta massa requereix densificació del monitoratge i mesures preventives abans que el deteriorament es generalitzi.

La MAS69 presenta fonts amb conductivitat, SO_4^{2-} i NO_3^- superiors als límits. El Pou de l'Hemalosa mostra una signatura clara de contaminació ramadera (nitrats, sulfats, conductivitat elevada). Altres fonts de la mateixa massa (Font de l'Avi (Calders), Font de les Tàpies (Calders), Font de l'Abellar (Monistrol de Calders)) també superen el límit de nitrats. En aquest sentit, la MAS69, classificada com a bon estat el 2021, està evolucionant cap a deteriorament per intensificació de la ramaderia. La detecció el 2023-2024 suggereix pressió recent o emergent posterior a la classificació oficial. Aquesta massa és candidata a reclasseficació com a mal estat en el proper cicle de planificació (2027) si no s'implementen mesures correctores.

L'anàlisi realitzat identifica dos sectors amb discrepàncies crítiques:

1. Zona pirinenca (capçalera del Llobregat, MAS05): Excedències d'origen natural que requereixen revisió de límits, no mesures de descontaminació.
2. Zona de Depressió Central (MAS69, MAS20): Contaminació antròpica emergent que requereix acció preventiva urgent.

La diferenciació entre ambdós casos (origen natural vs. antròpic) és crítica per dissenyar respostes adequades, amb la revisió tècnica de límits en el primer cas i mesures de protecció i control de pressions en el segon.

Les discrepàncies entre la classificació oficial (estat "Bo") i la detecció de contaminació en fonts específiques responen a cinc escenaris complementaris:

1. Deteriorament localitzat amb resolució espacial insuficient de la xarxa oficial: La xarxa de monitoratge de l'ACA, dissenyada per avaluar l'estat general de masses de gran extensió, pot no detectar deteriorament en zones puntuals. Les fonts de la Diputació, amb major densitat espacial, detecten aquests "punts calents" que la xarxa oficial promig amb zones no afectades.
2. Pressions antròpiques recents posteriors a l'avaluació 2021: La contaminació detectada el 2023-2024 pot correspondre a noves pressions desenvolupades després de la classificació oficial (intensificació agrícola/ramadera, noves indústries, ampliació d'urbanitzacions).
3. Zones de vulnerabilitat localitzada dins de masses preservades: Les fonts contaminades poden situar-se en sectors de més permeabilitat, menor temps de residència o proximitat a zones de recàrrega dins de masses que, de mitjana, mantenen bon estat. Aquestes zones

actuen com a "sentinelles" que alerten del deteriorament potencial abans que es generalitzi.

4. Evolució progressiva cap a mal estat químic futur: La contaminació actual, tot i ser localitzada, pot predir un deteriorament generalitzat en els propers cicles si les pressions continuen o s'intensifiquen. La detecció primerenca permet una intervenció preventiva.
5. Inadequació dels llandars per a sistemes geoquímicament particulars: El cas MAS05 demostra que els llandars uniformes poden ser inapropiats per a sistemes amb mineralització natural elevada. Requereix un enfocament cas per cas, considerant la geoquímica de fons específica.

5.4.2.1 Conclusió

L'anàlisi de les pressions antròpiques sobre el sistema hidrogeològic provincial revela tres conclusions fonamentals:

1. Sinergia entre estrès climàtic i pressions antròpiques: degradació accelerada en situació de sequera: El període 2021-2024 no només va evidenciar l'impacte de la sequera sobre els cabals (analitzat a la secció anterior), sinó també la intensificació dramàtica dels efectes de contaminació preexistent. La sequera no causa la contaminació, però la fa crítica mitjançant la pèrdua de l'efecte de dilució natural. Fonts que en condicions humides mantenien concentracions de nitrats/clorurs per sota dels llandars, sota sequera superen els límits de potabilitat per simple concentració del volum reduït d'aigua. A més, la sobreexplotació per compensar el dèficit superficial mobilitza contaminants acumulats en la zona no saturada i modifica els patrons de flux, connectant aquífers prèviament aïllats amb fonts de contaminació. El cas extrem és el col·lapse funcional (Font del Xalet a Bigues i Riells del Fai): sobreexplotació i sequera convergeixen per eliminar completament el recurs. Aquesta sinergia implica que les projeccions d'impacte del canvi climàtic han de considerar no només la reducció del recurs disponible, sinó també la degradació accelerada de la qualitat: cada episodi de sequera deixa el sistema més vulnerable al següent.
2. Vulnerabilitat jerarquitzada: els sistemes més productius són els més amenaçats: L'anàlisi confirma la jerarquia de vulnerabilitat ja identificada per als cabals, però amb un matís crític per a la contaminació: els aquífers porosos al·luvials-col·luvials, els més productius i accessibles (ubicats en valls, fàcils d'explotar), són també els més vulnerables a contaminació difusa. Aquesta combinació (alta productivitat i alta vulnerabilitat i ubicació en zones d'activitat intensa) els converteix en recursos estratègics sota amenaça prioritària. Paradoxalment, els sistemes de baixa permeabilitat menys productius poden oferir major seguretat de qualitat a llarg termini per la seva protecció natural, tot i que la seva baixa productivitat limita el seu aprofitament. Aquesta paradoxa ha d'informar les estratègies de gestió: protecció extrema dels al·luvials productius mitjançant control estricte de pressions a les seves àrees de recàrrega, mentre que els

sistemes de baixa permeabilitat poden tolerar certa pressió territorial sense degradació (tot i que requereixen vigilància per la seva lenta recuperació si es contaminen).

3. Discrepàncies amb la classificació oficial com a sistema d'alerta primerenca, no com a error: Les fonts contaminades detectades en masses classificades com a bon estat químic (MAS05, MAS20, MAS69) no invaliden la classificació de l'ACA, sinó que proporcionen informació complementària crítica. Actuen com a sistema d'alerta primerenca detectant: (a) deteriorament incipient en zones específiques abans de generalitzar-se (MAS20, MAS69), (b) pressions emergents posteriors a l'última avaluació oficial, (c) zones de vulnerabilitat localitzada que requereixen protecció preventiva, i (d) inadequació de llindars uniformes per a sistemes geoquímicament particulars (MAS05).
4. La integració de xarxes de monitoratge complementàries (oficial de l'ACA + xarxa de fonts de la Diputació) maximitza la capacitat de detecció: la xarxa oficial avalua l'estat general a escala de massa, mentre que la xarxa de fonts detecta anomalies locals. Ambdues són necessàries i complementàries. Les discrepàncies no són contradiccions sinó informació que s'ha d'integrar per a una gestió adaptativa: revisió periòdica de classificacions amb dades actualitzades, ajust de llindars cas per cas segons la geoquímica natural, densificació de monitoratge en zones crítiques identificades, i intervenció preventiva en masses que mostren senyals de deteriorament incipient abans que arribin a mal estat químic oficialment.

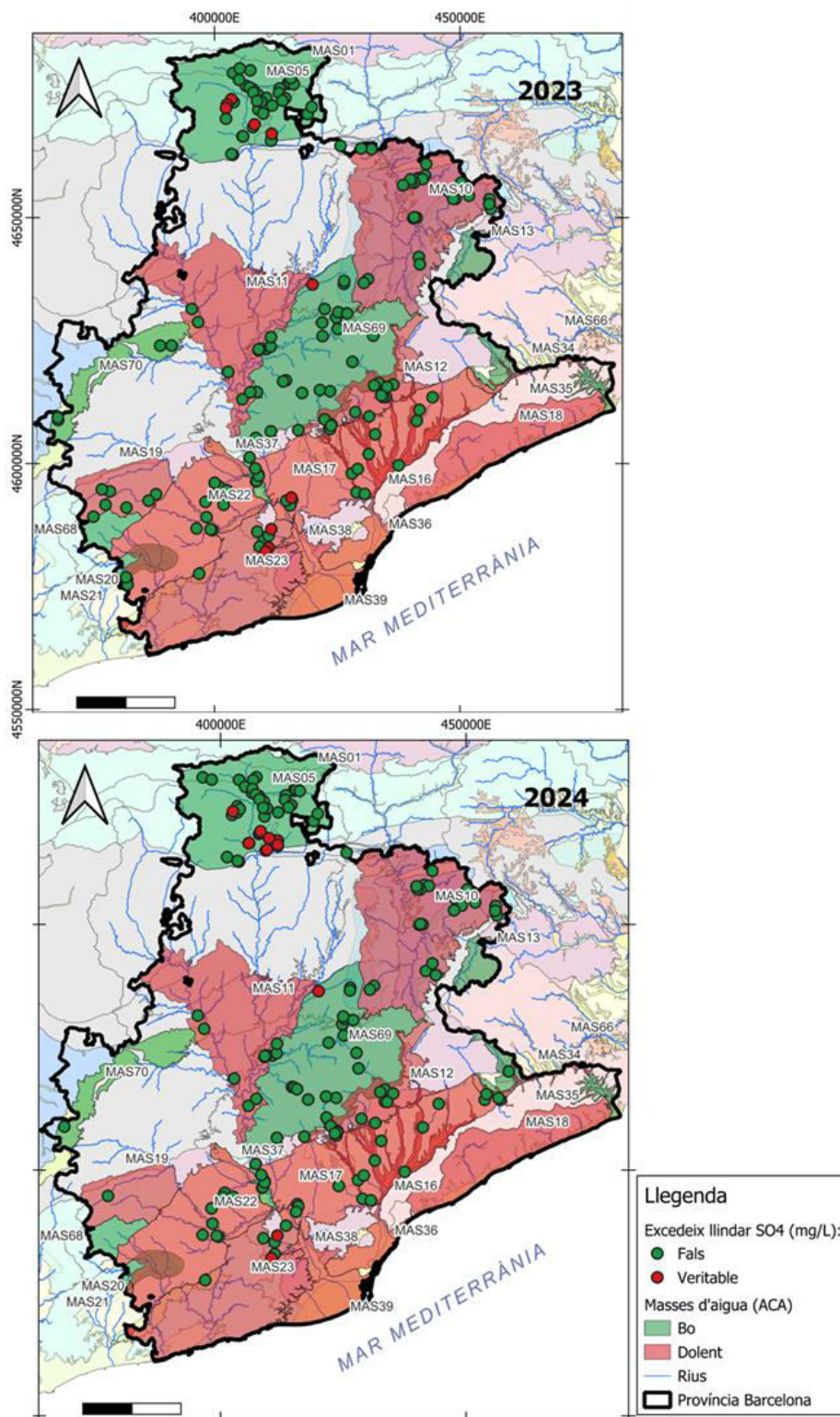


Figura 21: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració de sulfat, el 2023 i el 2024, segons els líndars per a cada massa d'aigua.

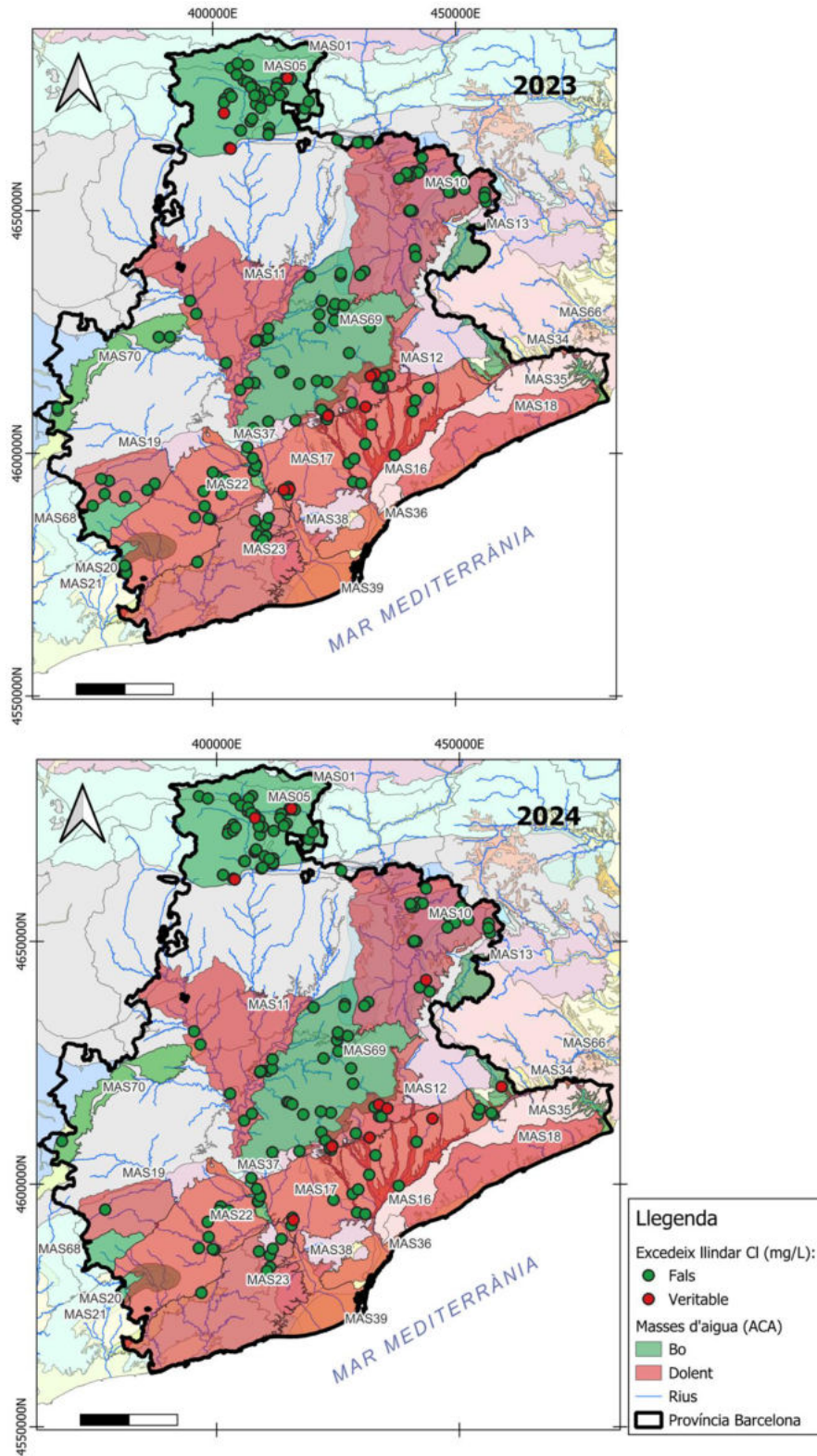


Figura 22: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració de clorur, el 2023 i el 2024, segons els límits per a cada massa d'aigua.

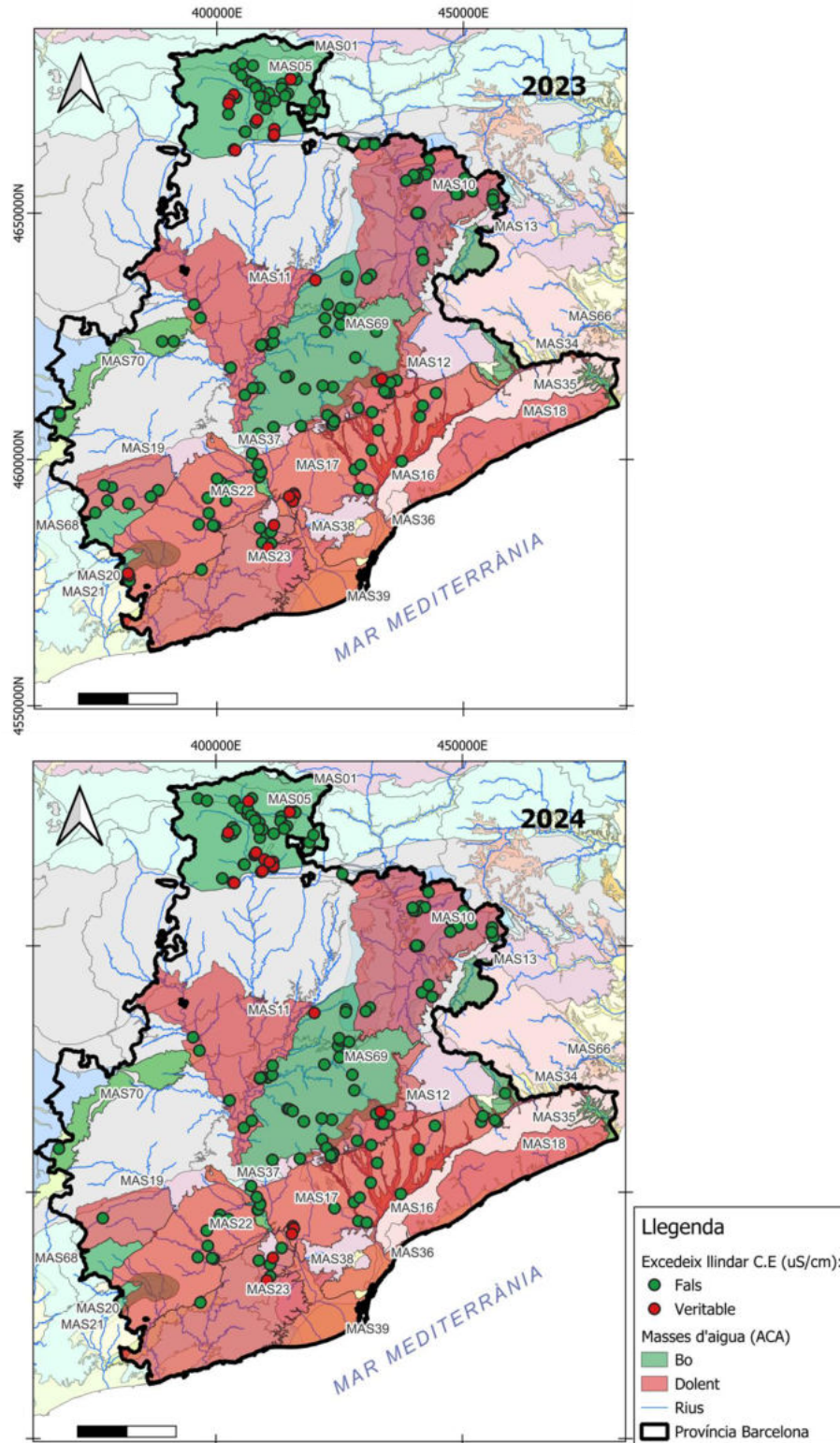


Figura 23: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la conductivitat elèctrica, el 2023 i el 2024, segons els l'indars per a cada massa d'aigua.

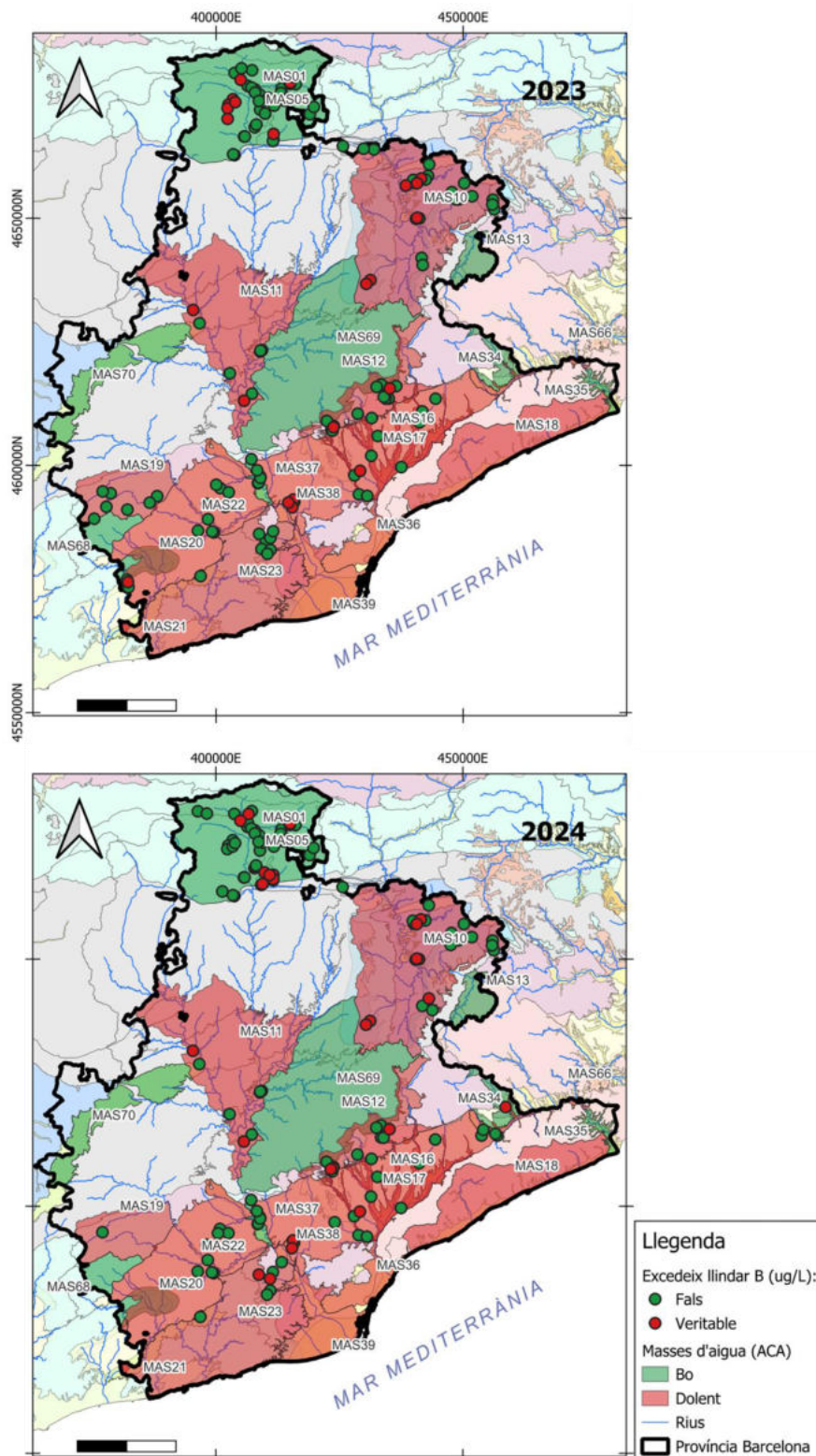


Figura 24: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració de bor, el 2023 i el 2024, segons els lllindars per a cada massa d'aigua.

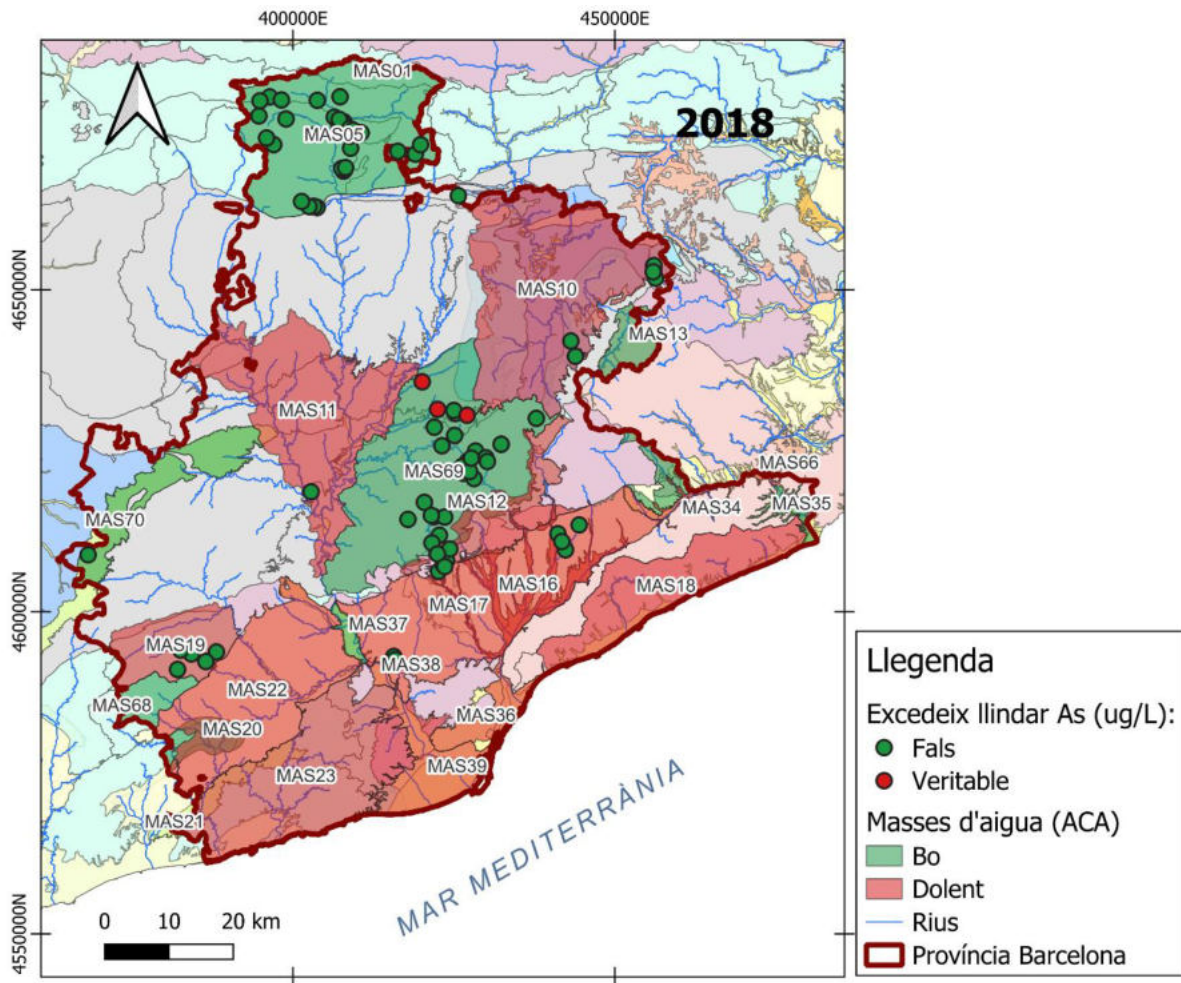


Figura 25: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració d'arsènic, el 2018, segons els líndars per a cada massa d'aigua.

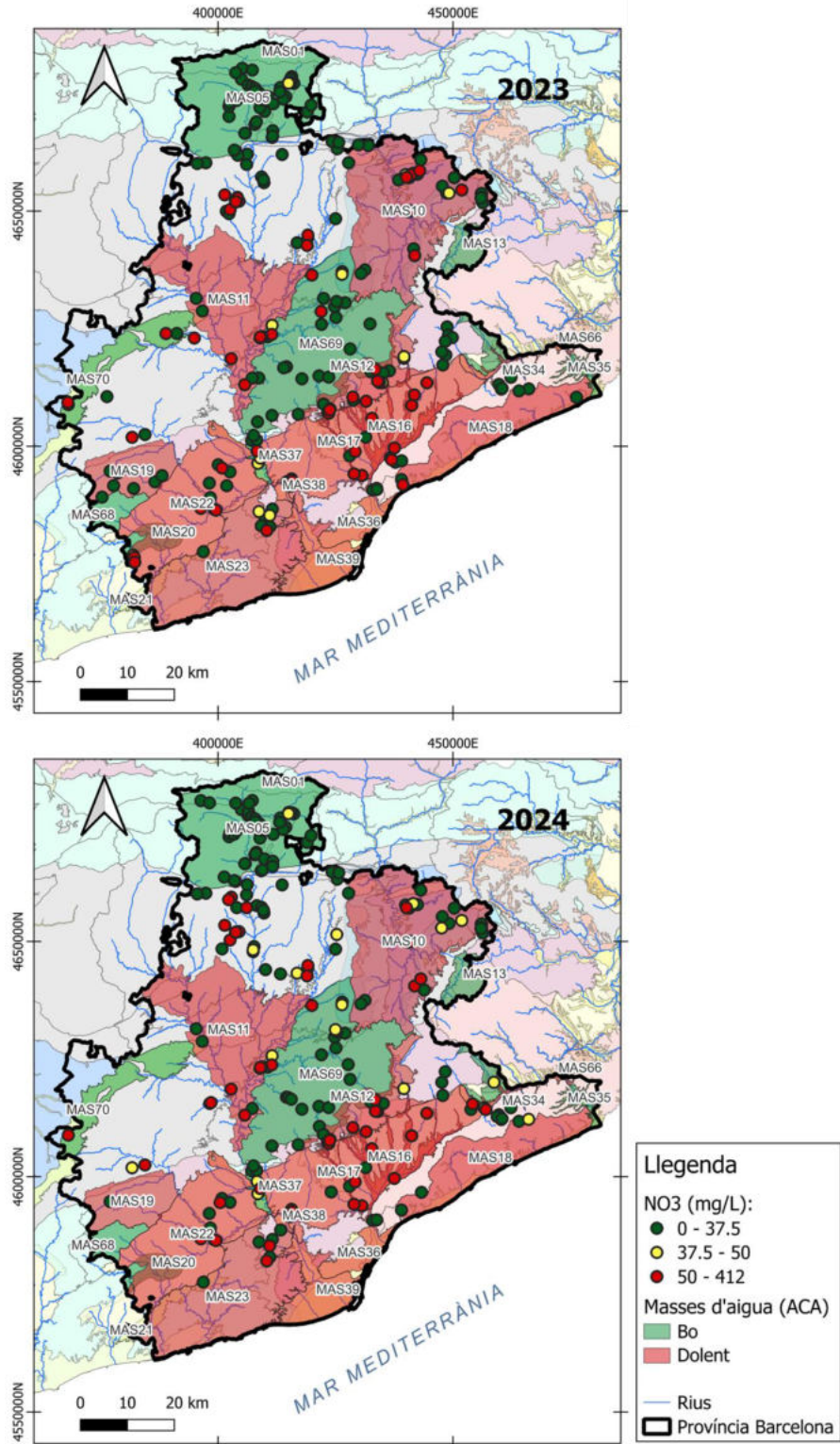


Figura 26: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració de nitrat, el 2023 i el 2024, segons els llinars per a cada massa d'aigua.

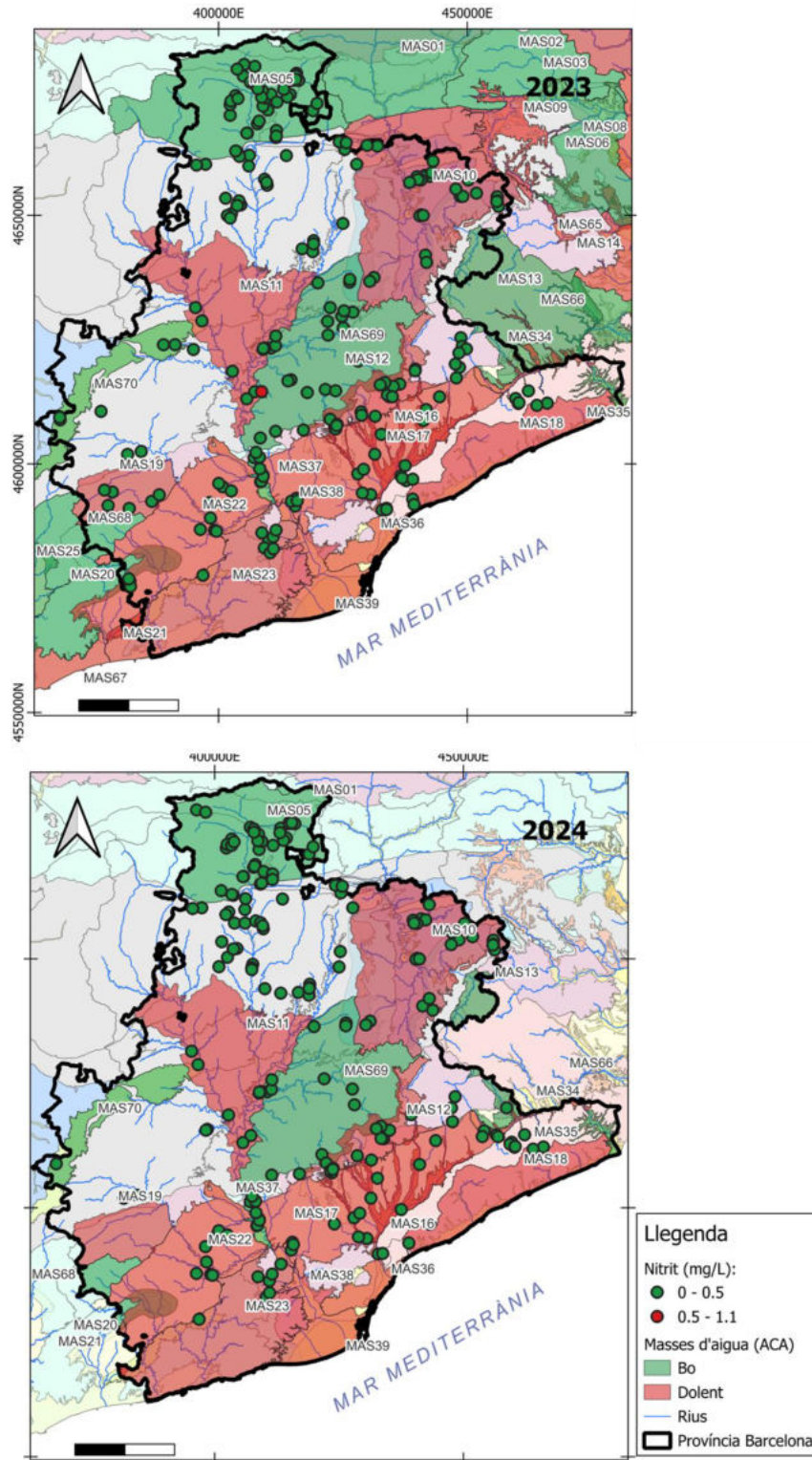


Figura 27: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració de nitrit, el 2023 i el 2024, segons els líndars per a cada massa d'aigua.

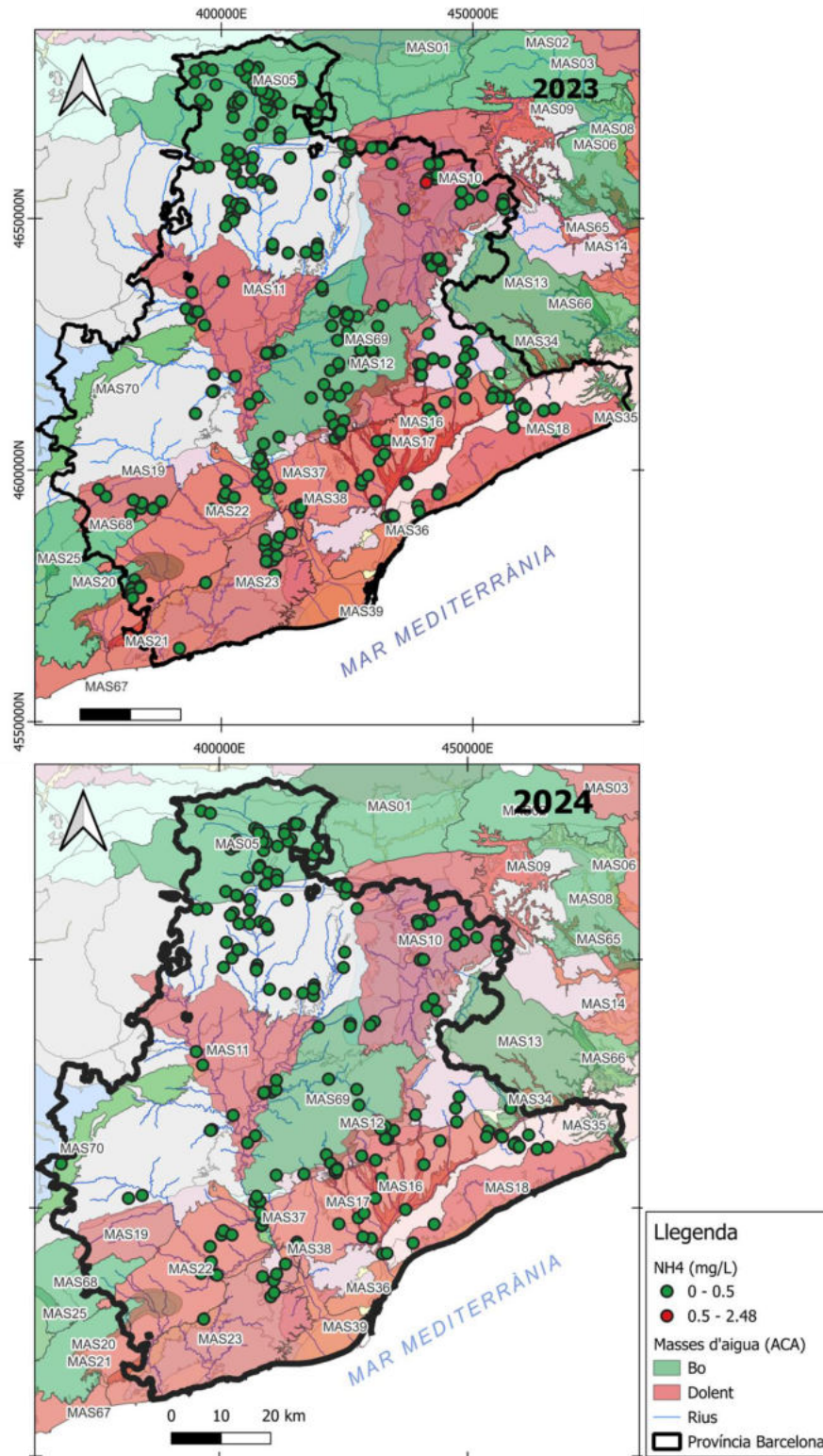


Figura 28: Distribució espacial de les fonts que excedeixen la concentració d'amoni, el 2023 i el 2024, segons els llindars per a cada massa d'aigua.

5.4.2.2 Conclusions i Recomanacions

La identificació de discrepàncies entre l'estat oficial de les masses i la qualitat puntual de les fonts suggereix la necessitat de:

1. **Densificació del monitoratge:** Ampliar la xarxa de punts de control en masses classificades com a "Bo" per detectar de manera primerenca signes de deteriorament localitzat, particularment en zones de dipòsits al·luvials i àrees de recàrrega. Incloure dins d'aquesta xarxa les fonts de la província, amb èmfasi en aquelles que superen els llindars establerts.
2. **Actualització de les classificacions:** Revisar la classificació de les masses d'aigua basant-se en les dades més recents de 2023-2024, tenint en compte que l'última classificació oficial data de 2021. Es suggereix que aquesta nova classificació redefineixi els llindars establerts per a la massa d'aigua MAS05, atès que presenta moltes excedències en B, SO₄, Cl i C.E., controlades per la geologia del sector i no per accions antròpiques.
3. **Identificació de zones crítiques:** Prioritzar mesures de protecció en fonts la química de les quals supera els llindars de l'ACA i que es troben en masses de Bona qualitat química, com a possibles àrees d'alerta primerenca.
4. **Seguiment específic de pressions emergents:** Establir protocols de vigilància intensiva en zones on es detectin noves pressions antropogèniques o canvis de fàcies hidroquímica.

6 Proposta d'anàlisis complementàries : Isòtops de Deuteri ($\delta^2\text{H}$) i Oxigen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) a Fonts de la Província de Barcelona

Els anàlisis realitzats el 2023-2024 han caracteritzat les fonts de la província mitjançant paràmetres fisicoquímics (temperatura, pH, conductivitat elèctrica), composició hidroquímica (fàcies, ions majors) i cabals. Tot i que aquests paràmetres revelen la signatura actual de l'aigua, no proporcionen informació sobre:

1. Origen i trajectòria del flux subterrani
2. Procés de mescla entre aigües de diferent procedència
3. Intensitat de la interacció aigua-roca durant la circulació
4. Recàrrega moderna (distinció crítica en períodes de sequera prolongada)

El informe ha identificat tres resultats crítics que els que els isòtops poden determinar:

1) Jerarquia de vulnerabilitat davant la sequera (Secció 5.3)

Els sistemes kàrstics i fissurats mostren un col·lapse abrupte dels cabals durant 2022-2024, mentre que els sistemes de baixa permeabilitat mantenen estabilitat. Els isòtops revelaran si aquesta estabilitat reflecteix:

1. Zona de recàrrega: Determinar si l'estabilitat prové de recàrrega d'una àrea muntanyosa extensa ($\delta^{18}\text{O}$ empobrit) versus recàrrega local propera ($\delta^{18}\text{O}$ enriquit). La recàrrega llunyana de muntanya indica major capacitat de regulació; la recàrrega local reflecteix vulnerabilitat a la sequera local.
2. Mescla de fluxos: Identificar si hi ha combinació de flux ràpid superficial (sensible a sequera) amb flux lent profund (resistent), permetent una gestió diferenciada segons el component

Això tindria implicacions per a la gestió, ja que si la zona de recàrrega es troba en una muntanya d'altitud més elevada, com els Pirineus, el recurs té una major resiliència davant sequera que si depèn de recàrrega local de la plana; això modifica la estratègia de protecció de les àrees de recàrrega, prioritzant la conservació de zones muntanyoses clau per mantenir la regulació del sistema hidrogeològic.

2) Canvis de fàcies hidroquímica i pressions antròpiques (Secció 5.2 i 5.4)

L'increment de fàcies clorurades i sulfatades 2023-2024 s'atribueix parcialment a la sequera (concentració) i parcialment a contaminació (agricultura, ramaderia). Els isòtops permetran distingir:

1. Aigua moderna contaminada ($\delta^{18}\text{O}$ enriquit per evapotranspiració agrícola).
2. Aigua antiga de major salinitat ($\delta^{18}\text{O}$ empobrit).

Això afegeix un criteri per a la priorització d'intervencions: si es tracta de contaminació moderna, s'ha d'actuar de manera local i urgent; si és mobilització d'aigua antiga salina, cal gestionar els nivells piezomètrics del sistema.

3) Heterogeneïtat espacial de sistemes de flux (Secció 5.3)

L'absència de patrons espacials coherents en les tendències de cabal suggereix sistemes locals amb diferents característiques hidrogeològiques. Els isòtops permetran cartografiar:

1. Zona de recàrrega altitudinal:
 - Fonts a la plana amb $\delta^{18}\text{O}$ empobrit (típic de muntanya) → flux regional de capçalera.
 - Fonts amb $\delta^{18}\text{O}$ enriquit (típic de planura) → flux local. Això identifica on es recarrega realment cada font, no on està ubicada. També permet detectar zones de flux profund/lent ($\delta^{18}\text{O}$ enriquit).
2. Proporcions de mescla: Si la font mostra $\delta^{18}\text{O}$ intermedi, es pot calcular el percentatge de contribució de flux de muntanya vs. plana.
3. Zones de mescla subsuperficial: On se solapen dos sistemes de flux, els isòtops ho revelen com composicions isotòpiques intermèdies.

El mapa de distribució isotòpica és equivalent al mapa de direcció del flux subterrani (piezometria). Permet identificar conques hidrogeològiques (que poden o no coincidir amb les

conques superficials) i la relació entre els cossos d'aigua superficials i els aquífers (riu guanyador o riu perdedor).

6.1 Fonaments Tècnics

$\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$ com a traçadors hidrogeològics (Clark i Fritz, 1997):

1. Determinació de la zona de recàrrega (altitud/latitud): $\delta^{18}\text{O}$ varia sistemàticament amb l'altitud de precipitació. Així, mesurant el $\delta^{18}\text{O}$ de l'aigua d'una font s'estima l'altitud mitjana de la seva zona de recàrrega, permetent mapar si el flux prové de capçalera ($\delta^{18}\text{O}$ empobrit, $T < 0^\circ\text{C}$ mitjana anual) o de plana ($\delta^{18}\text{O}$ enriquit, $T > 10^\circ\text{C}$). Això és independent del temps de residència.
2. Identificació de mescla: En diagrames $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, les mescles de dues fonts es representen com a línies rectes. Això permet revelar les proporcions de fluxos antics vs. moderns, fluxos superficials vs. profunds.
3. Processos d'evapotranspiració/evaporació: L'aigua que ha patit una evapotranspiració o evaporació intensa (típica en retorns de regadiu, infiltració en zones àrides) s'enriqueix en isòtops pesants, desviant-se de la "Línia Meteorítica Local" (LML). Això permet diferenciar contaminació agrícola de contaminació urbana o industrial.

6.2 Disseny Optimitzat de Mostreig

6.2.1 Limitacions del Mostreig Total (2023)

El mostreig de les 233 fonts és innecessari perquè:

1. Redundància estratigràfica: Diverses fonts pertanyen al mateix aquífer/unitat hidrogeològica amb el mateix origen. Dins d'una unitat homogènia, els isòtops seran similars.
2. Soroll vs. senyal: El mostreig dens dins d'una font homogènia no aporta informació nova; l'esforç ha d'anar destinat a fonts que resolguin preguntes específiques.

6.2.2 Estratègia de Mostreig específic (90-110 mostres)

A. Criteri 1: Representació d'unitats hidrogeològiques (UHG) amb variabilitat interna.

Taula 8: Justificació de n° de mostres proposades per a anàlisi isotòpic per unitat hidrogeològica

Unitat Hidrogeològica	N° fonts en estudi 2023-2024	N° mostres proposades	Justificació
Aquífer en medi fissurat (calcàries i gresos)	16	5	Homogeni; seleccionar altitudinals extrems (recàrrega alta vs. baixa)
Aquífer en medi fissurat i carstificat (calcàries i gresos)	132	19	Heterogeni; variabilitat de fàcies (100% $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ a 70%); requereix transecte vertical
Aquífer en medi porós i fissurat (calcàries i gresos)	20	4	Transicional; mostrejar extrems composicionals
Aquífer porós en formacions carbonatades	7	3	Transicional; mostrejar extrems composicionals

Aqüífer porós en medi al·luvial-col·luvial	48	15	CRÍTIC: Major vulnerabilitat i contaminació. Inclou 3 amb fàcies clorurades i 3 amb nitrats alts
Aqüífer porós en medi detrític granular (rebliments neògens i quaternaris)	49	12	Heterogeni; inclou Font de la Mina (anomalia de cabal) i Font del Refugi (contaminació crònica)
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en detrítics i margocalcaris	133	24	Variabilitat composicional; inclou casos de recuperació vs. deteriorament
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions granítiques	27	10	Presència de sodi anòmal; distingir origen: feldespat vs. aigües residuals urbanes
Medi de baixa permeabilitat amb aqüífers locals en formacions metamòrfiques (pissarres i esquists paleozoics)	19	8	Similar a granits; diferent context geològic
TOTAL	451	100	

B. Criteri 2: Gradient altitudinal (control de zones de recàrrega)

A causa que l'informe identifica un fort control litològic (Secció 5.2), però també estrès climàtic emergent (Secció 3.1, increment tèrmic 0.5 °C 2016 2024), és crític mostrejar:

1. 3 fonts en zona de capçalera (>1000 m): Llobregat superior, Cardener, Berguedà. Per establir la signatura isotòpica de muntanya, en la zona de recàrrega.
2. 4 fonts en muntanya mitjana (600 1000 m): Prepirineu, Montseny.
3. 4 fonts en plana depressió (<200 m): Vallès, Baix Llobregat. Per establir la signatura isotòpica de plana.

Això permet construir un perfil isotòpic altitudinal de referència per a tota la província, essencial per interpretar les altres mostres.

C. Criteri 3: Fonts "anòmales" (responen preguntes específiques)

Aquest criteri inclou fonts amb comportament excepcional documentat a l'informe 2023-2024. Són 9 casos específics, dins de les unitats hidrogeològiques (UHG) ja comptabilitzades en el Criteri 1, però seleccionades específicament perquè resolguin preguntes crítiques.

Taula 9: Proposta de fonts amb anomalies detectades.

Anomalia Identificada	Font Específica	Municipi	UHG a què pertany	Pregunta Isotòpica
Estabilitat en sequera (cabdal >1 L/s 2023-2024)	Font del Castell; Font de la Boixa	Sant Julià de Cerdanyola; Alpens	Aqüífer fissurat-carstificat	Zona de recàrrega a muntanya llunyana (flux regional) o local?

Col·lapse de cabal (2024: cabal=0 L/s)	Font d'en Xa	Santa Maria de Palautordera	Aqüífer porós al·luvial-col·luvial	Desconnexió de flux o estancament d'aigua residual?
Augment de cabal en sequera (anomalia)	Font de la Mina	Masquefa	Aqüífer porós detrític granular	Connexió amb riu contaminat o flux regional profund?
Contaminació crònica estable (100 mg/L NO ₃)	Font del Refugi	Castellar del Vallès	Aqüífer porós detrític granular	Contaminació local o transportada?
Contaminació crònica estable	Font de Can Companyà	Castellbisbal	Aqüífer porós al·luvial-col·luvial	Contaminació local o transportada?
Recuperació post-contaminació	Font del Pujol	Montseny	Mitjans de baixa permeabilitat granítics	El flux que es recupera té el mateix origen?
Fàcies sulfatada natural (evaporites)	Font del Patzí	la Nou de Berguedà	Aqüífer fissurat-carstificat (MAS05)	La recàrrega toca evaporites o és natural?
Fàcies sulfatada natural	Font de Belians	Vallcebre	Aqüífer fissurat-carstificat (MAS05)	La recàrrega toca evaporites o és natural?

Subtotal anomalies: **9 mostres de 9 fonts.**

D. Criteri 4: Validació hidroquímica (mescla de fàcies)

Punts específics amb canvis de fàcies 2023 2024 per validar si l'evolució és:

1. Natural (mescla a zona carstificat o evolució per circulació prolongada)
2. Antròpica (contaminació progressiva)

Exemples: Font del Cement a Sant Vicenç de Castellet (contaminació progressiva), Font de l'Alzina a Santa Coloma de Gramenet (episodis de contaminació)

Les mostres seleccionades ja estan incloses dins del Criteri 1.

6.2.3 Disseny Final Proposta: 100 Mostres

Desglossament:

1. Representació Unitats Hidrogeològiques: ~65-75 mostres
2. Anomalies: 10 mostres
3. Validació barreja: 10 mostres
4. Reservi (10% marge): 5-10 mostres

La distribució dels punts proposats es presenta a la Figura 29. No obstant això, un cop acceptada la proposta d'anàlisi complementària, a la reunió inicial de l'estudi es

seleccionaran les fonts definitives i el nombre concret a analitzar conjuntament amb l'equip de la Diputació de Barcelona.

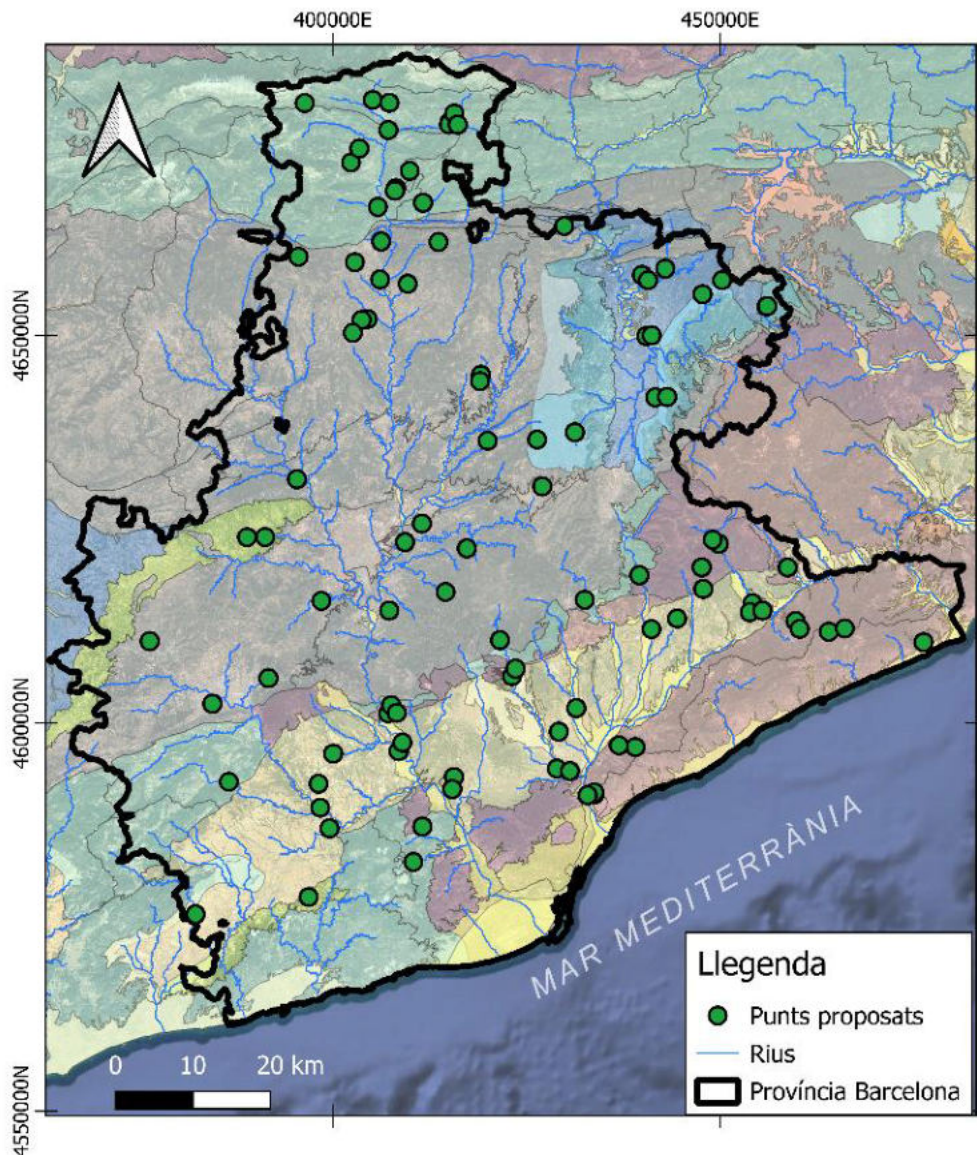


Figura 29: Distribució espacial de les fonts proposades per a anàlisi isotòpic de δ^2H i $\delta^{18}O$ a la molècula d'aigua.

6.3 Protocol de Mostreig i Anàlisi

Característics del mostreig:

1. Ampolles: Vials de 10 mL sense aire (l'aigua omple completament el recipient) per prevenir fraccionament isotòpic per evaporació.
2. Etiquetatge: ID de la font, data, hora, temperatura in situ, conductivitat i pH mesurats al camp.

3. Conservació: Recipients segellats amb parafilm, emmagatzemats a 4 °C fins a l'anàlisi (màxim 3 mesos).

Laboratori: Espectrometria de Masses Isotòpica

Tècnica: Laser Spectroscopy per a δD i $\delta^{18}O$ (IRMS o CRDS). Estàndards: VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

Resolució analítica: δ^2H : $\pm 1\text{‰}$ i $\delta^{18}O$: $\pm 0.1\text{‰}$

Lliurables per mostra:

- δD (‰)
- $\delta^{18}O$ (‰)
- Excés de deuteri ($d\text{-excess} = \delta^2H - 8 \times \delta^{18}O$)

6.4 Justificació dels Punts Específics (10 Mostres anomalies)

6.4.1 Zona Carstificada (Capçalera Llobregat i Cardener))

Mostres: Font del Xalet (Bigues i Riells del Fai), Font de la Foradada (Guardiola de Berguedà), Font Gran (Cercs)

Justificació: Segons l'informe (Secció 5.1, Temperatura), aquestes fonts presenten $T \leq 10$ °C i estan situades en zona de recàrrega ràpida càrstica. Els isòtops permetran determinar la seva zona de recàrrega precisa, crítica per diferenciar si són fonts de descàrrega local o formen part del sistema regional, amb implicacions directes sobre la resiliència davant la sequera.

6.4.2 Aquífer Al·luvial Contaminat (Vallès, Baix Llobregat)

Mostres: Font Santa a Sant Pere de Torelló (amoni detectat), Font de Boada Vell a Palau-solità i Plegamans ($\Delta CE \sim 1000$ $\mu S/cm$), Font d'en Xa a Santa Maria de Palautordera (col·lapse de cabal)

Justificació: Segons l'informe (Secció 5.4), aquests són exemples de "sinergia sequera + contaminació". Els isòtops permetran determinar si la contaminació és local (zona de recàrrega propera a la plana) o bé transportada per fluxos regionals que travessen zones agrícoles de muntanya i aporten nitrats des de cap amunt. En el cas de la Font del Xalet amb cabal nul, els isòtops confirmaran si realment hi ha desconnexió del flux o simplement estancament d'aigua residual antiga.

6.4.3 Sistema Estable Baix Sequera (Baixa Permeabilitat Metamòrfica)

Mostra: Font de Ca l'Antic (Figaró-Montmany)

Justificació: Segons l'informe (Secció 5.3), els sistemes de baixa permeabilitat conserven cabals durant la sequera. Els isòtops permetran respondre: la zona de recàrrega es troba a muntanya llunyana ($\delta^{18}O$ empobrit), la qual cosa explicaria la resiliència de la font gràcies al

flux lent d'un aqüífer profund regional, o bé es tracta de recàrrega local molt lenta ($\delta^{18}\text{O}$ similar a l'entorn), però que flueix de manera molt pausada

6.4.4 Anomalia d'Augment a la Sequera (Detrític Granular)

Mostra: Font de la Mina (Masquefa)

Justificació: Segons l'informe (Secció 5.4), presenta un augment de cabal durant la sequera, anomalia explicada per connexió amb un riu contaminat. Els isòtops mostraran si la composició isotòpica coincideix amb la del riu Llobregat (mixta moderna) o amb l'aqüífer regional (més homogènia).

6.4.5 Validació de Evaporites Naturals (MAS05)

Mostres: 3 fonts de capçalera Llobregat amb $\text{SO}_4 > 200 \text{ mg/L}$ o $\text{Cl} > 200 \text{ mg/L}$

Justificació: Segons l'informe (Secció 5.4, Correspondència amb l'ACA), MAS05 presenta excedències naturals en SO_4 , Cl^- i B per formacions evaporítiques. Els isòtops confirmaran si aquestes fonts tenen zona de recàrrega en profunditat (on circulen aigües properes a guixos) o recàrrega superficial (en aquest cas, el SO_4 seria anòmal). A més, permetran estimar si l'aigua d'evaporites prové de flux regional profund o és local.

6.5 Productes Lliurables

Els productes esperats són:

1. Diagrama $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ amb classificació per unitat hidrogeològica i fàcies.
2. Mapa espacial de $\delta^{18}\text{O}$ (recàrrega altitudinal).
3. Validació de contaminació vs. mescla natural per a les 43 fonts identificades.
4. Informe interpretatiu (10-15 pàgines) integrant els resultats isotòpics amb hidroquímica i geologia.
5. Base de dades de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ i d-excess per a totes les mostres, disponible per a futurs controls i seguiments.
- 6.

7 Proposta d'accions de difusió dels resultats obtinguts.

Amb l'objectiu de garantir l'adequada transferència del coneixement generat i promoure la utilitat científica, tècnica i social de l'anàlisi temporal i espacial de la qualitat química de les fonts de la província de Barcelona, es plantegen diverses accions estratègiques de difusió. Aquestes activitats estan orientades tant a la comunitat científica com a les administracions públiques, entitats privades i ciutadania interessada en la gestió i conservació dels recursos hídrics.

1. Presentació de resultats al Congrés CIAS 2026 (Barcelona)

Es proposa la presentació formal dels resultats de l'estudi al Congrés Ibèric d'Aigües Subterrànies (CIAS) 2026, que se celebrarà a Barcelona. Aquest fòrum especialitzat permetrà compartir els avanços científics amb investigadors nacionals i internacionals, així com rebre retroalimentació experta per reforçar la interpretació i l'abast dels resultats. La ponència inclourà els aspectes metodològics, els patrons temporals i espacials identificats i les implicacions per a la gestió de les fonts i de les masses d'aigua subterrània.

2. Publicació d'un article en una revista científica d'alt impacte (Q1)

Amb l'objectiu d'assegurar la visibilitat acadèmica i la validació científica dels resultats, es planteja l'elaboració i l'enviament d'un manuscrit a una revista indexada de quartil 1 (Q1) en les àrees d'hidrogeologia, ciències ambientals o gestió de recursos hídrics. L'article tractarà el marc conceptual, els mètodes analítics aplicats, els resultats obtinguts i la seva rellevància en el context de la qualitat de l'aigua en sistemes hidrogeològics mediterranis durant períodes de sequera. La publicació permetrà ampliar la difusió internacional i afavorir la reproductibilitat de la metodologia emprada.

3. Presentació en jornades tècniques amb entitats públiques i privades

Es preveu la realització de presentacions i sessions de transferència dirigides a administracions públiques, organismes gestors de l'aigua, empreses del sector ambiental i entitats privades vinculades al territori. Aquestes jornades tenen com a finalitat facilitar l'aplicació pràctica dels resultats, especialment en relació amb la planificació hidràulica, el control de la qualitat de l'aigua, la conservació de les fonts i la presa de decisions en matèria de gestió sostenible.

La presentació adaptarà el contingut tècnic al perfil dels participants, emfasitzant recomanacions operatives i escenaris de millora.

8 Conclusions

L'anàlisi integral de les fonts de la província de Barcelona durant el període 2016-2024 revela un sistema hidrogeològic complex sotmès simultàniament a estrès climàtic sever i a pressions antròpiques creixents, la interacció sinèrgica de les quals està accelerant processos de degradació tant quantitativa com qualitativa dels recursos hídrics subterrànies.

Des de la perspectiva fisicoquímica, el sistema evidencia senyals inequívocs de l'impacte de l'escalfament climàtic regional. L'increment tèrmic progressiu de 0,5 °C entre 2016-2024, amb una acceleració notable durant el període 2023-2024, reflecteix la influència del canvi climàtic sobre els aqüífers, especialment evident en fonts de flux somer que responen més directament a les condicions superficials. La conductivitat elèctrica mostra una tendència ascendent coherent amb el període de sequera prolongada 2021-2023, en què la reducció de la recàrrega disminueix l'efecte de dilució natural i augmenta la contribució proporcional de fluxos profunds més mineralitzats. Aquest increment de mineralització no és només un valor estadístic, sinó una senyal hidrogeoquímica de l'estrès hídric al qual està sotmès el sistema. El pH, en canvi, manté una estabilitat temporal i espacial notable, amb predomini absolut de valors neutres a lleugerament alcalins, evidenciant el control litològic carbonàtic a escala provincial. Aquesta estabilitat reflecteix la maduresa geoquímica del sistema, on l'efecte tampó dels carbonats protegeix contra l'acidificació i manté condicions químiques favorables independentment de les pertorbacions externes.

La caracterització hidroquímica confirma el domini d'aqüífers carbonatats al territori, amb el 61,2 % de les fonts presenten fàcies bicarbonatades càlciques com a signatura fonamental. Aquesta predominança no és homogènia, sinó que evoluciona segons la complexitat hidrogeològica de cada sistema. Els aqüífers fissurats simples mostren una homogeneïtat química absoluta, mentre que els sistemes carstificats, porosos i al·luvials presenten una diversitat creixent que reflecteix un major temps de residència, heterogeneïtat litològica i, en certs casos, influència antròpica. L'anàlisi dels canvis de fàcies entre 2023 i 2024 revela trajectòries evolutives que funcionen com a traçadors de processos actius. Les evolucions des de fàcies bicarbonatades cap a sulfatades assenyalen contacte amb formacions evaporítiques; les transicions cap a fàcies sòdiques identifiquen alteració de silicats o intercanvi catiònic; les evolucions cap a fàcies clorurades indiquen pressió antròpica creixent. Particularment preocupant és l'aparent increment de fàcies amb component clorurat i sulfatat el 2024, concentrat especialment en zones costaneres i de plana al·luvial del sud i sud-est provincial, on la sinergia entre sequera i activitat agrícola-ramadera-urbana intensifica la salinització del sistema.

L'anàlisi de l'evolució dels cabals proporciona evidència directa de l'impacte de l'excepcional sequera 2021-2023 sobre el funcionament hidrogeològic. El període revela un descens generalitzat dels cabals, una reducció dràstica de la variabilitat estacional, disminució dels pics màxims i esgotament progressiu de les reserves aqüíferes. La pèrdua d'amplitud estacional durant 2022-2024, culminant amb la homogeneïtat de 2023, constitueix una senyal d'alarma crítica que indica la transició des del funcionament normal cap a un mode d'emergència, en què el sistema descarrega reserves sense reposició efectiva. La resposta

diferenciada segons el tipus d'aqüífer confirma una jerarquia de vulnerabilitat: els sistemes carstificats i fissurats, tot i ser més productius en condicions normals, col·lapsen abruptament sota sequera per la seva alta connectivitat hidràulica; els sistemes porosos detrítics pateixen un descens gradual però sostingut; i els sistemes de baixa permeabilitat mantenen cabals mínims però estables gràcies a la seva desconnexió efectiva del cicle climàtic a curt termini. L'absència de patrons espacials coherents en les tendències de cabal demostra que els factors hidrogeològics locals específics tenen més pes que els factors climàtics regionals en determinar la resposta de cada font, amb implicacions crítiques per a la gestió, que requereix una aproximació cas per cas en lloc de polítiques uniformes a escala provincial.

L'anàlisi de les pressions antròpiques revela que el sistema no només afronta estrès climàtic sinó també contaminació significativa, amb el 7,4 % de les fonts monitoritzades mostrant influència antròpica detectable. La contaminació agrícola i ramadera, manifestada principalment mitjançant nitrats com a traçador ubic, constitueix la pressió més estesa territorialment, presentant tres patrons diferenciats: contaminació crònica estable en fonts que mantenen concentracions superiors a 50 mg/L durant anys, contaminació progressiva amb increment gradual que indica acumulació en l'aqüífer, i episodis puntuals de contaminació seguits de recuperació parcial en sistemes de renovació ràpida. La contaminació industrial i urbana, tot i ser més localitzada, presenta senyals específiques com conductivitat extremadament elevada amb fàcies clorurades sòdiques o combinació de múltiples indicadors que confirmen l'origen antròpic. Particularment crític és el patró de col·lapse funcional detectat en fonts on la sobreexplotació per bombejos combinada amb sequera provoca desconnexió total del flux, evidenciant sinergia extrema entre ambdues pressions que condueix a degradació terminal del sistema.

La vulnerabilitat diferencial dels aquífers davant la contaminació replica parcialment la jerarquia identificada per a cabals. S'observa que els sistemes més productius i accessibles, particularment els aquífers porosos al·luvials-col·luvials ubicats en valls amb agricultura i ramaderia intensiva, són també els més vulnerables a la contaminació difusa per la seva alta permeabilitat, connexió directa amb la superfície i posició com a receptors finals de fluxos contaminats. Aquesta combinació els converteix en recursos estratègics sota amenaça prioritària que requereixen protecció extrema mitjançant control estricte de les pressions a les seves àrees de recàrrega. Els sistemes de baixa permeabilitat, tot i ser menys productius, ofereixen major seguretat de qualitat per la seva protecció natural, encara que un cop contaminats la seva lenta renovació dificulta la recuperació durant dècades.

La comparació amb la classificació oficial de masses d'aigua subterrània de l'ACA revela una correspondència general en zones d'alta pressió coneguda, on les masses en mal estat presenten efectivament fonts amb contaminació significativa, validant el sistema de monitoratge oficial. No obstant això, la detecció de fonts contaminades en quatre masses classificades com a bon estat químic no constitueix una contradicció sinó informació complementària crítica que funciona com a sistema d'alerta primerenca. Aquestes discrepàncies identifiquen deteriorament incipient localitzat en zones específiques abans de generalitzar-se, pressions emergents posteriors a l'última avaluació oficial de 2021, zones de

vulnerabilitat particular dins de masses que, de mitjana, mantenen bon estat, i inadequació d'uns líndars uniformes per a sistemes geoquímicament particulars com la MAS05, on les excedències (valors per damunt dels líndars normatius) de conductivitat, bor i sulfats responen a control litològic natural per formacions evaporítiques i no a contaminació antròpica. La integració de xarxes de monitoratge complementàries maximitza la capacitat de detecció i permet una gestió adaptativa basada en dades actualitzades de múltiples escales espacials.

L'anàlisi evidencia que el sistema hidrogeològic provincial està travessant un període d'estrès múltiple sense precedents en el registre històric recent. La sequera excepcional 2021-2023, catalogada per l'AEMET com la més severa des de 1920, no només va reduir la disponibilitat quantitativa del recurs, sinó que simultàniament va intensificar l'impacte de la contaminació preexistent mitjançant la pèrdua de l'efecte de dilució natural, l'increment de la contribució proporcional de fluxos profunds mineralitzats i la mobilització de contaminants acumulats per descens de nivells piezomètrics. Aquesta sinergia implica que les projeccions futures davant el canvi climàtic han de considerar no només la reducció del recurs disponible, sinó també la degradació accelerada de la qualitat, on cada episodi de sequera deixa el sistema més vulnerable a pressions posteriors per esgotament de la capacitat d'amortiment hidrogeològic.

Les senyals de recuperació incipient detectades el 2024, amb un lleuger increment dels cabals i recuperació parcial de la variabilitat estacional després de les precipitacions de finals del 2023 i inicis del 2024, indiquen que el sistema manté capacitat de resposta, encara que la recuperació completa requerirà diversos anys de recàrrega excedentària per reposar les reserves esgotades. L'heterogeneïtat de respostes entre diferents tipus d'aqüífers confirma que no existeix una única estratègia òptima de gestió, sinó que es requereixen aproximacions diferenciades segons la vulnerabilitat específica de cada sistema. Els aquífers fissurats i carstificats, per la seva alta sensibilitat, necessiten monitoratge continu i protecció prioritària de les àrees de recàrrega; els sistemes porosos al·luvials requereixen control estricte de les pressions antròpiques per la seva combinació d'alta productivitat i alta vulnerabilitat; els sistemes de baixa permeabilitat, tot i ser menys prioritaris en gestió a curt termini per la seva menor productivitat, necessiten planificació a llarg termini considerant la seva lenta renovació i potencial com a reserves estratègiques durant sequeres prolongades.

La caracterització integral realitzada demostra que les fonts naturals de la província funcionen no només com a recursos hídrics i patrimoni cultural, sinó també com a xarxa de monitoratge natural que proporciona informació hidrogeològica d'alta resolució espacial complementària a les xarxes oficials. La seva distribució ampla pel territori, accessibilitat i representativitat de diferents tipus d'aqüífers les converteixen en un sistema de vigilància inavaluable per a la detecció primerenca de canvis tant en quantitat com en qualitat de l'aigua subterrània. La continuïtat del monitoratge sistemàtic d'aquestes fonts, amb protocols estandarditzats i periodicitat adequada, és fonamental per a l'avaluació de l'estat del sistema, la detecció de tendències a llarg termini, la identificació de pressions emergents i la validació de les mesures de gestió implementades.

En un context de canvi climàtic amb projeccions d'increment de temperatura, reducció de precipitació anual, major freqüència i intensitat de sequeres, i més variabilitat interanual del règim pluviomètric per a la regió mediterrània, el sistema hidrogeològic de la província de Barcelona afronta desafiaments creixents que requereixen la transició d'una gestió reactiva cap a una gestió adaptativa i preventiva. La informació generada en aquest estudi proporciona una línia base actualitzada i una metodologia d'anàlisi integral que permet l'avaluació contínua de l'estat del sistema, la identificació de zones crítiques que requereixen protecció prioritària, el disseny d'estratègies diferenciades segons la vulnerabilitat específica de cada tipus d'aqüífer i la fonamentació tècnica per a polítiques d'ordenació territorial que considerin la capacitat de càrrega hidrogeològica com a limitant en el desenvolupament d'activitats econòmiques. La gestió sostenible dels recursos hídrics subterranis provincials dependrà de la capacitat d'integrar coneixement hidrogeològic detallat amb polítiques efectives de protecció de zones de recàrrega, control de pressions antròpiques i adaptació davant escenaris climàtics adversos, garantint així la disponibilitat i qualitat del recurs per a les generacions futures en un territori amb pressió territorial creixent i disponibilitat hídrica decreixent.

9 Referències

Agència Catalana de l'Aigua. (2021). *Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña 2022–2027*. Generalitat de Catalunya.

Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122.

Clark, I.D. & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. 328 pp.

Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.

Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., Gilroy, E. J., & Helsel, D. R. (2020). Statistical Methods in Water Resources-Supporting Materials. *US Geological Survey (USGS) Data Release*, 302.

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). (2012). Delimitación y caracterización de las Unidades Hidrogeológicas de Cataluña a escala 1:50.000. ICGC.

Mas-Pla, J., & Menció, A. (2019). Groundwater nitrate pollution and climate change: learnings from a water balance-based analysis of several aquifers in a western Mediterranean region (Catalonia). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2184-2202.

McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 445, 51-56.

Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6): 914-928.

Rotiroti, M., Zanotti, C., Fumagalli, L. & Bonomi, T. (2015). EasyQuim: a user-friendly software for geochemical analysis and modelling of groundwater. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 4(3): 31-40.

Téllez, B., Ripoll, O. & Pascual, R. (2024, 10 agosto). 2021-2023: Análisis de la sequía en Cataluña. AEMET blog. <https://aemetblog.es/2024/08/10/2021-2023-analisis-de-la-sequia-en-cataluna/>

10 ANNEX I

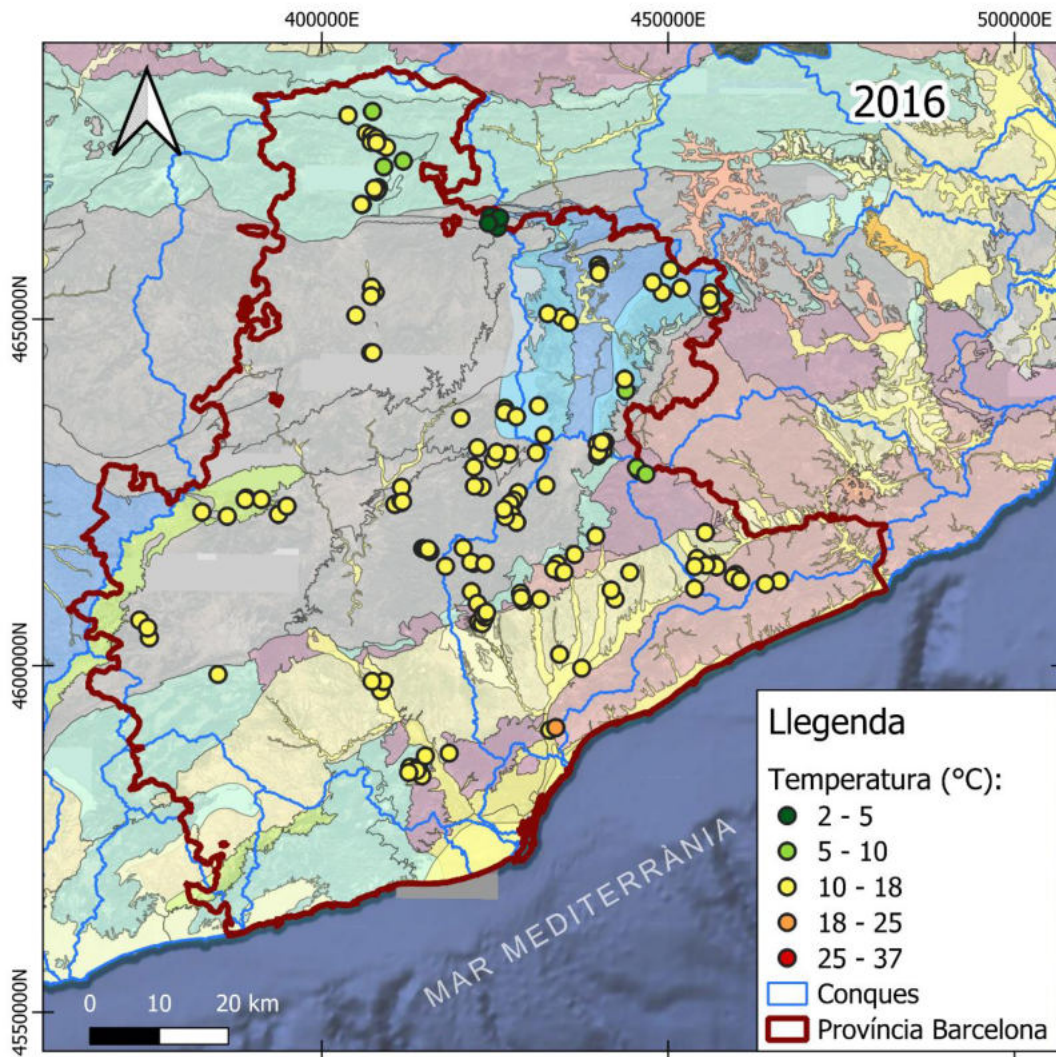


Figura I-1: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2016.

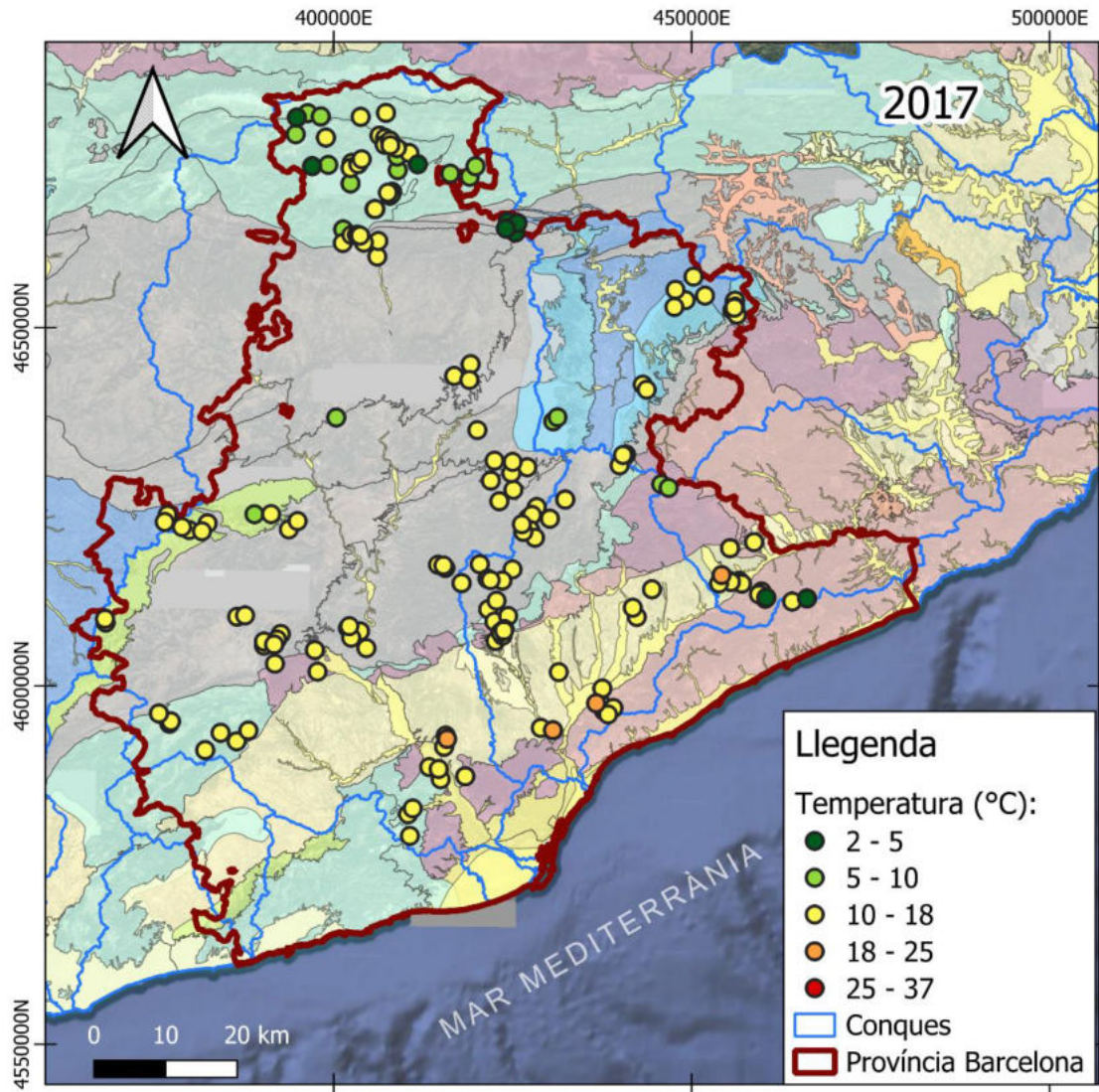


Figura I-2: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2017.

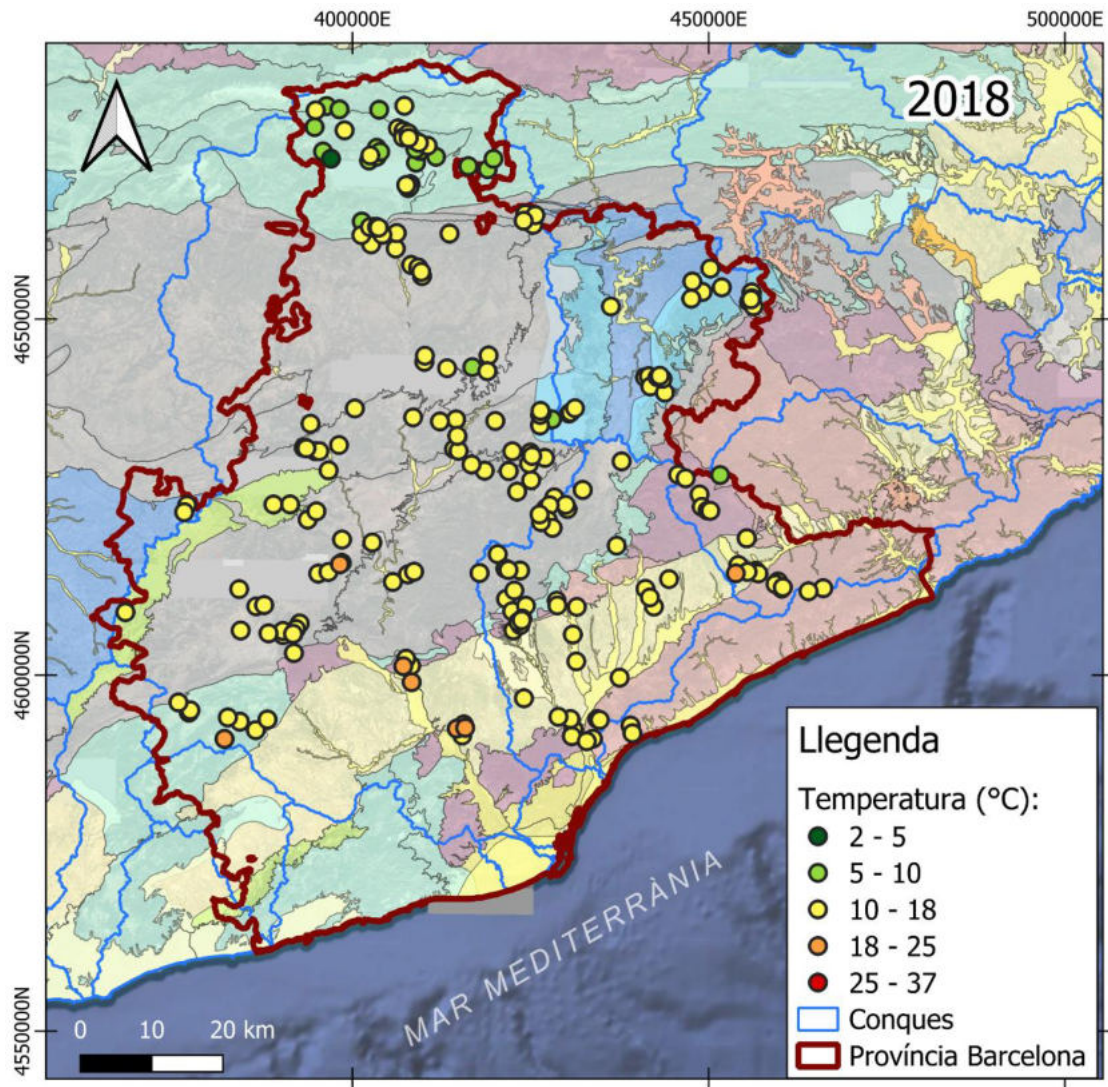


Figura I-3: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

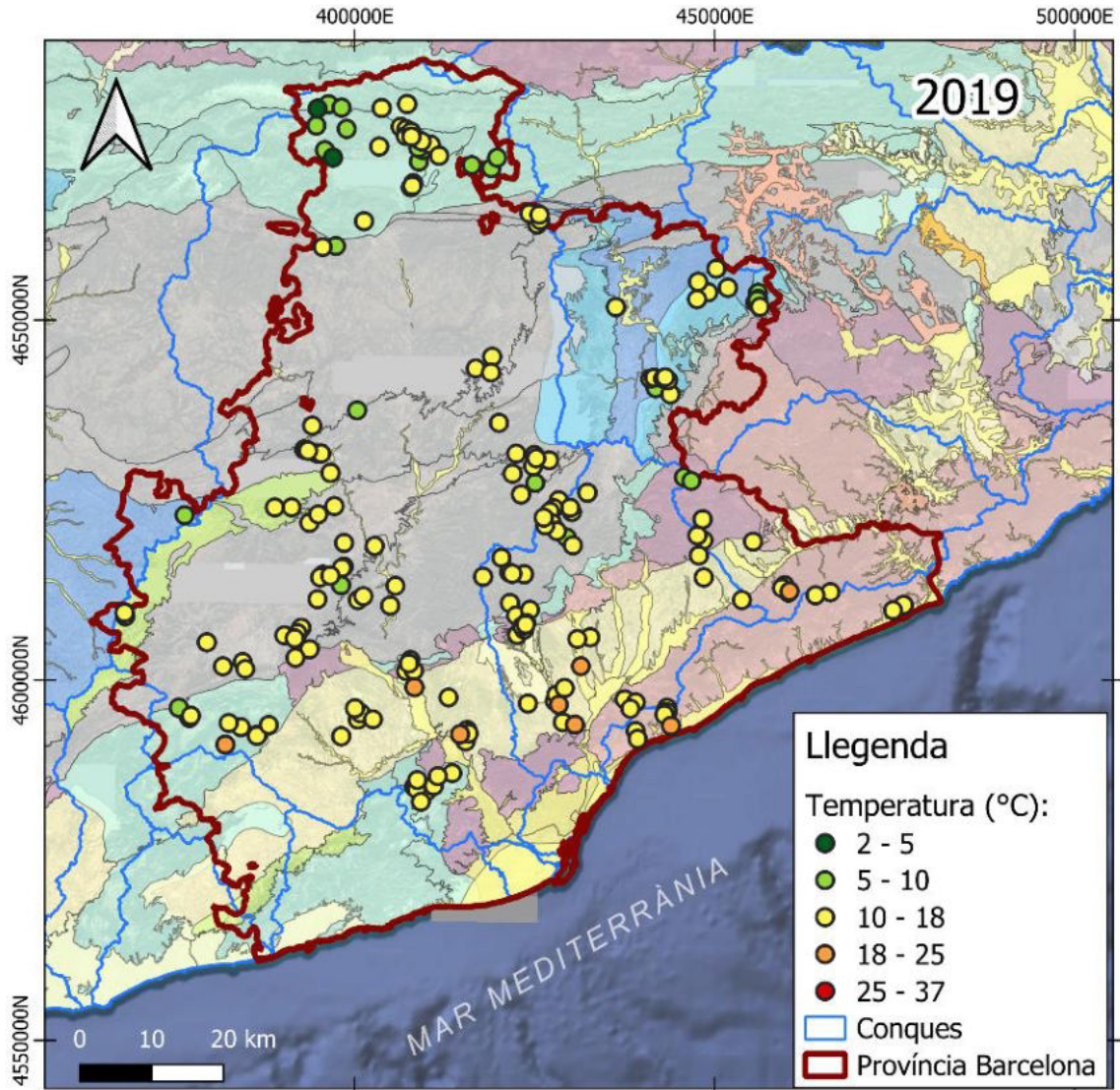


Figura I-4: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2019.

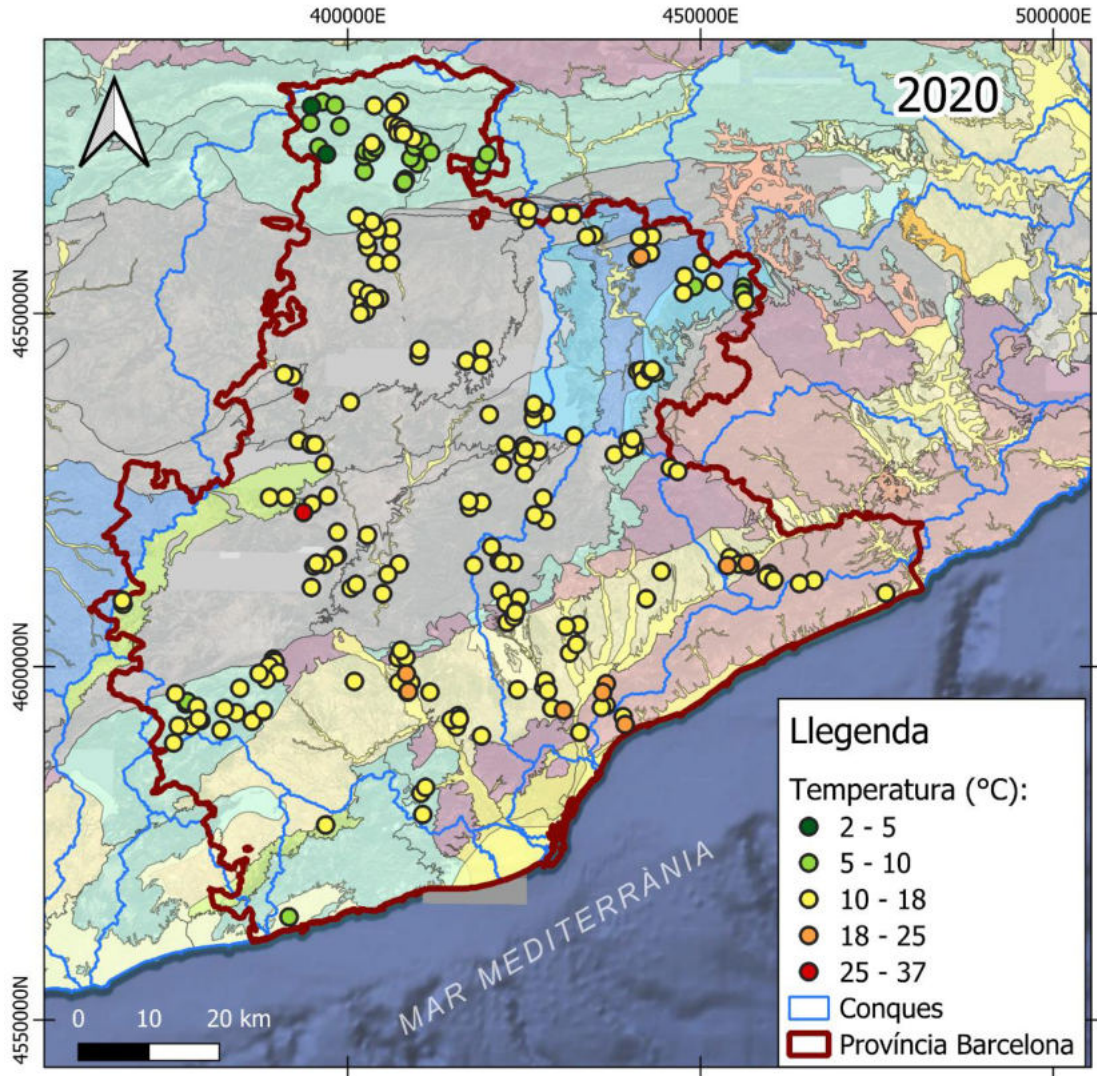


Figura I-5: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2020.

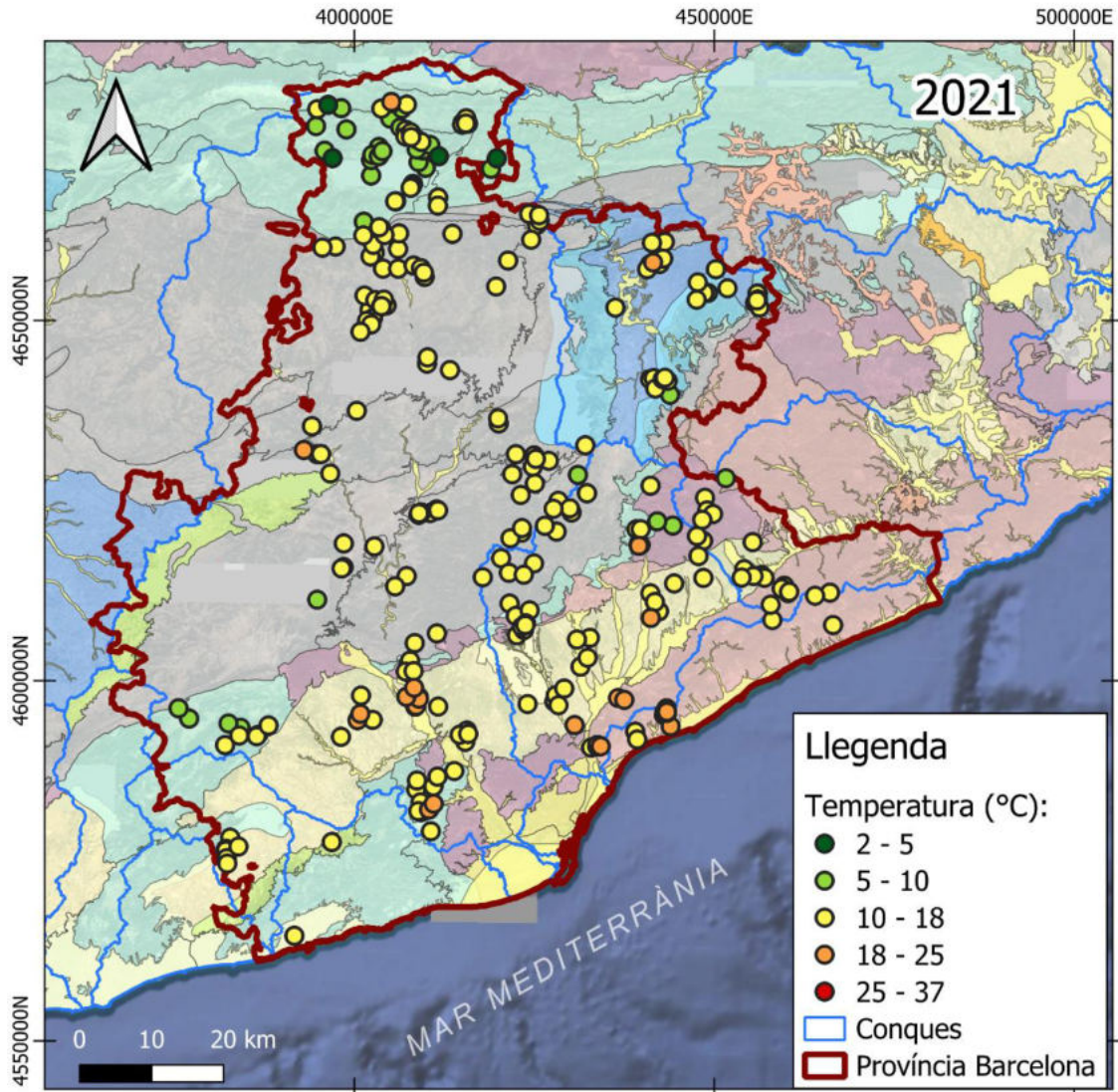


Figura I-6: Distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2021.

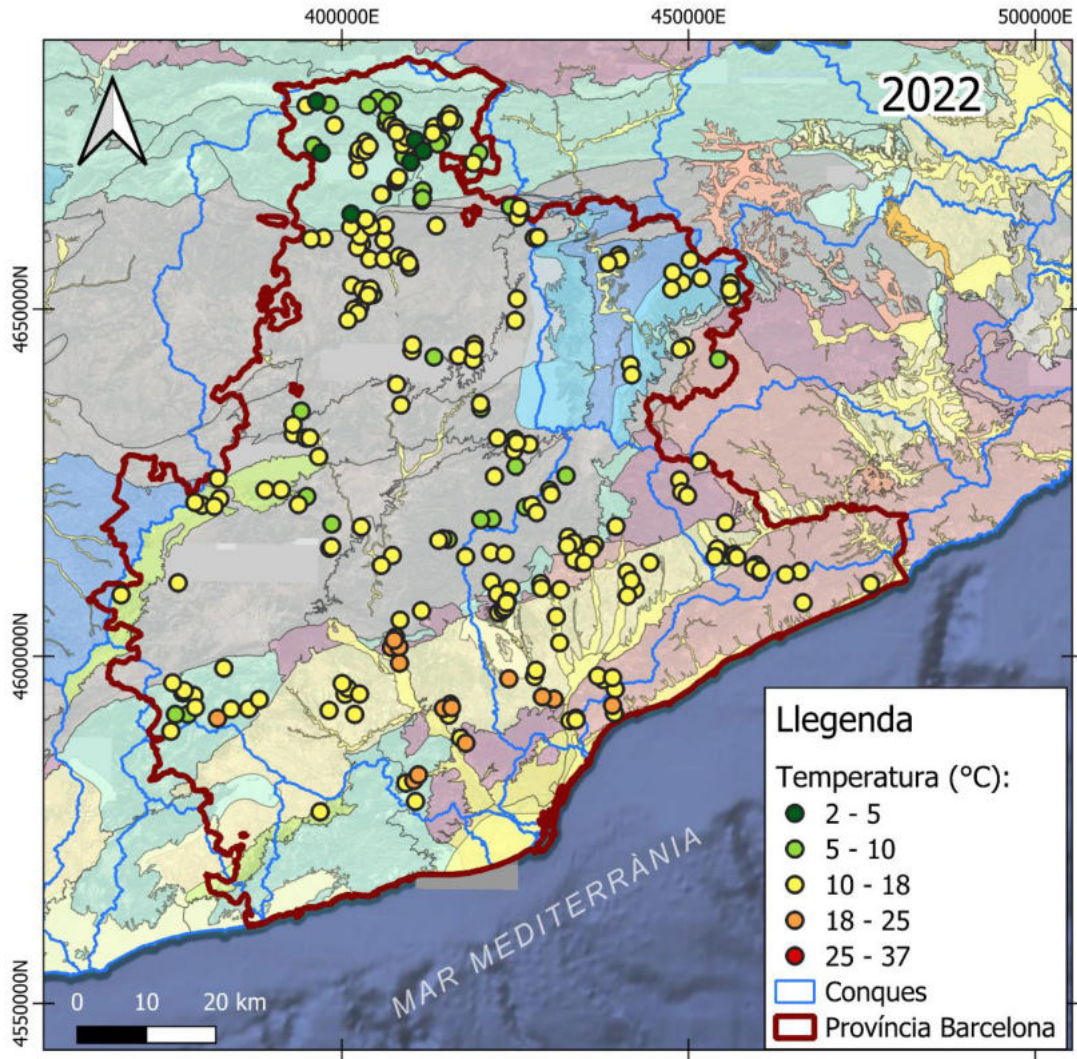


Figura I-7: Evolució de la distribució espacial de la temperatura (°C) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades2022.

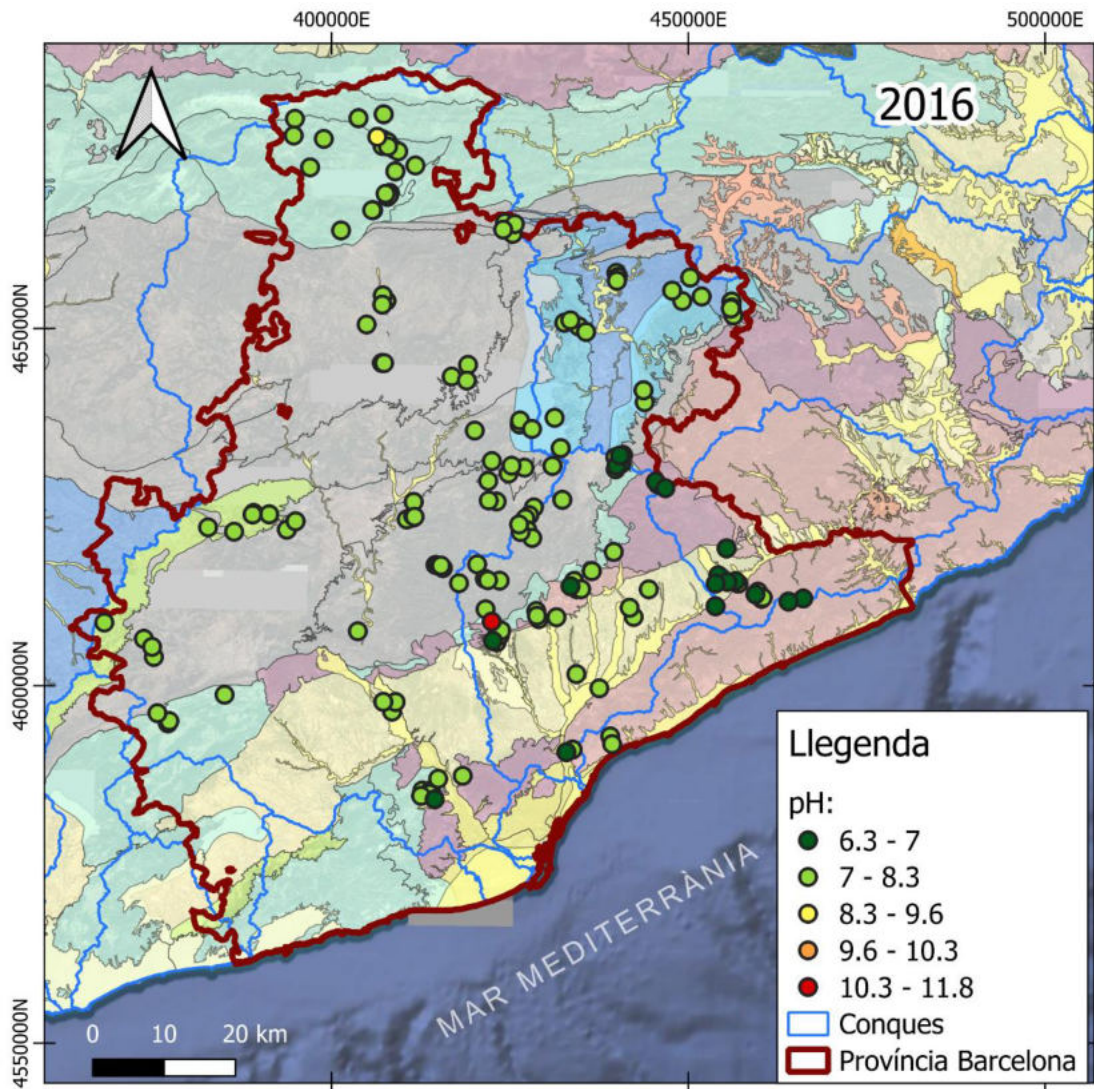


Figura I-8: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2016.

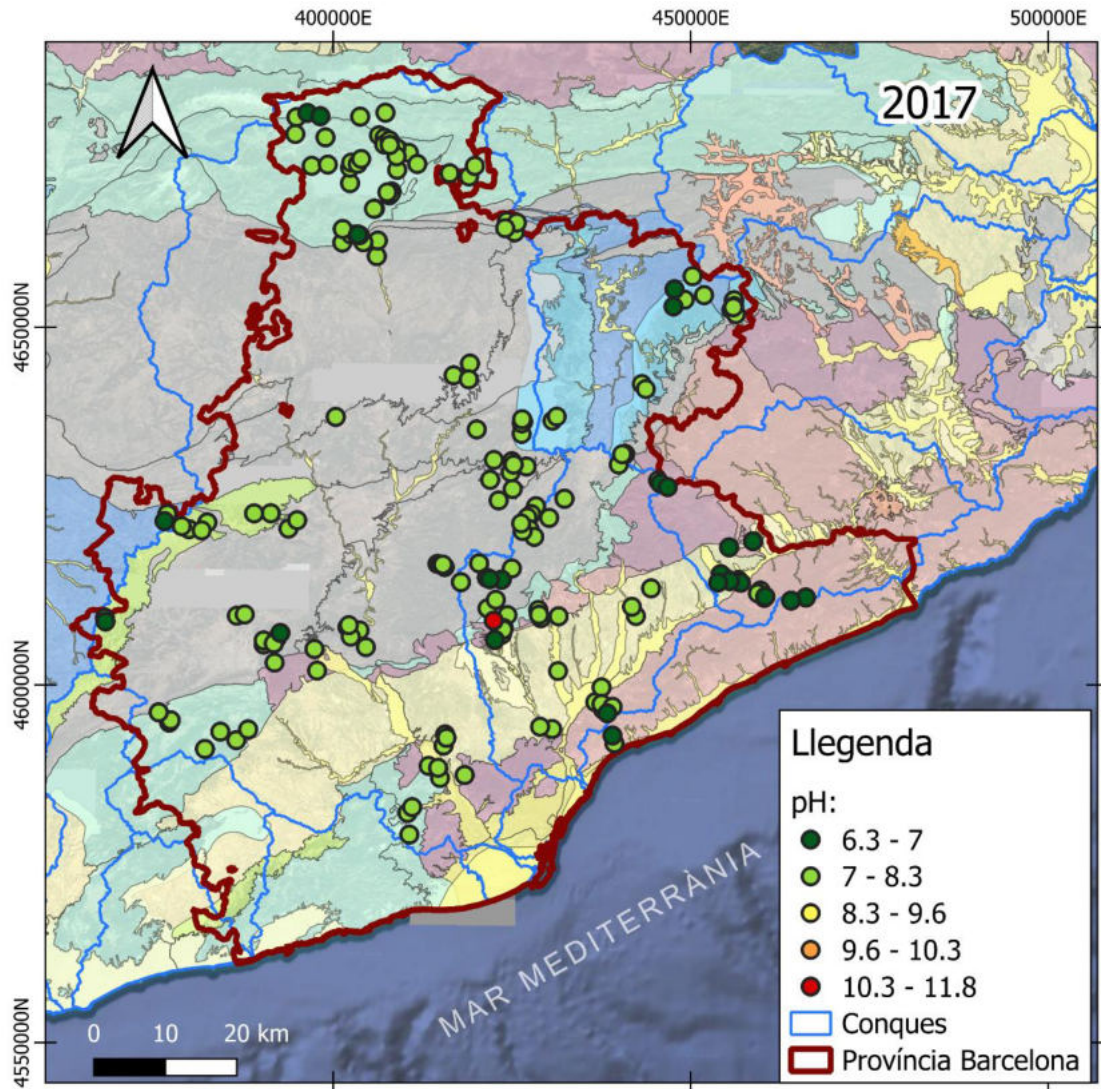


Figura I-9: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2017.

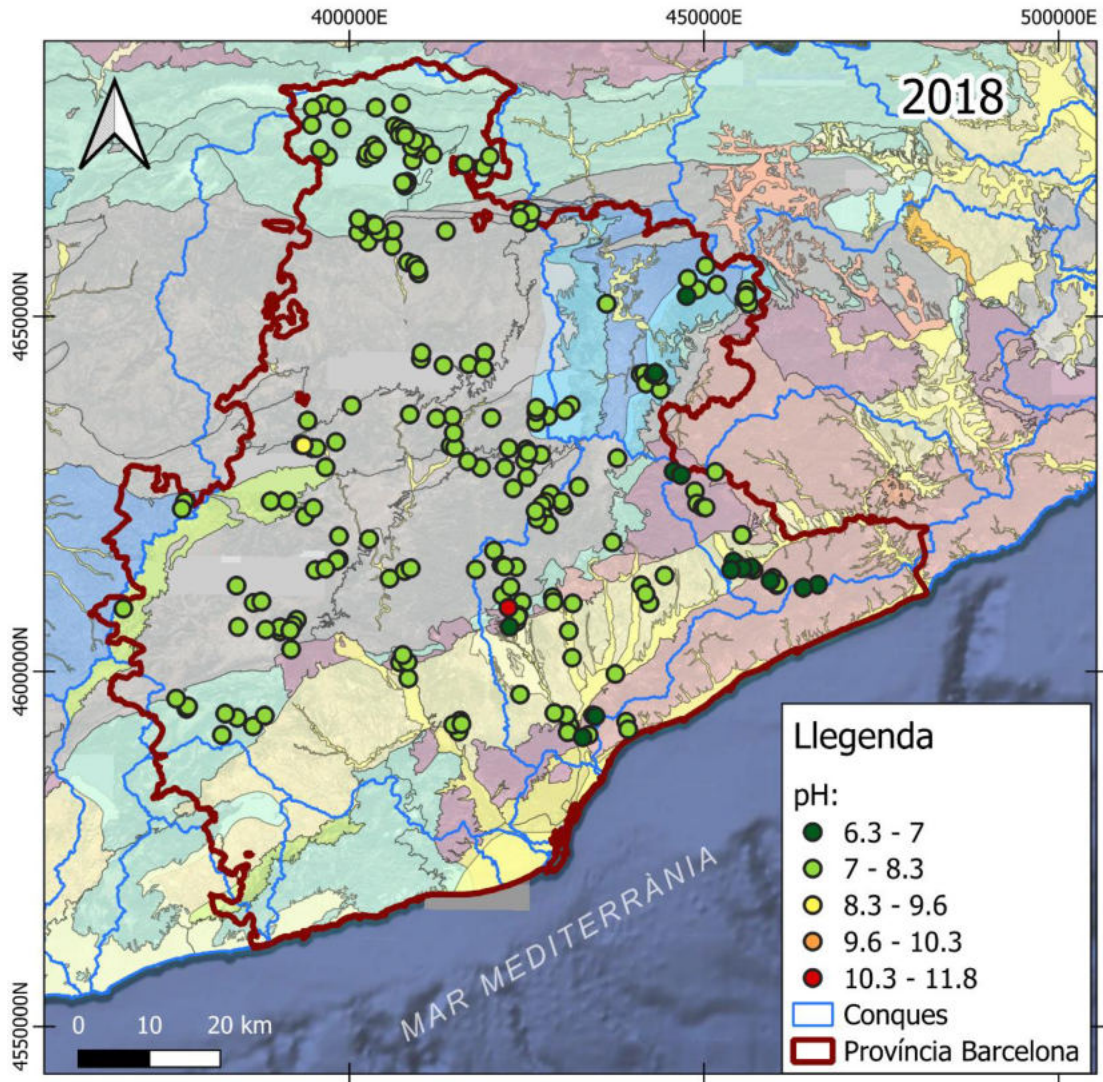


Figura I-10: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

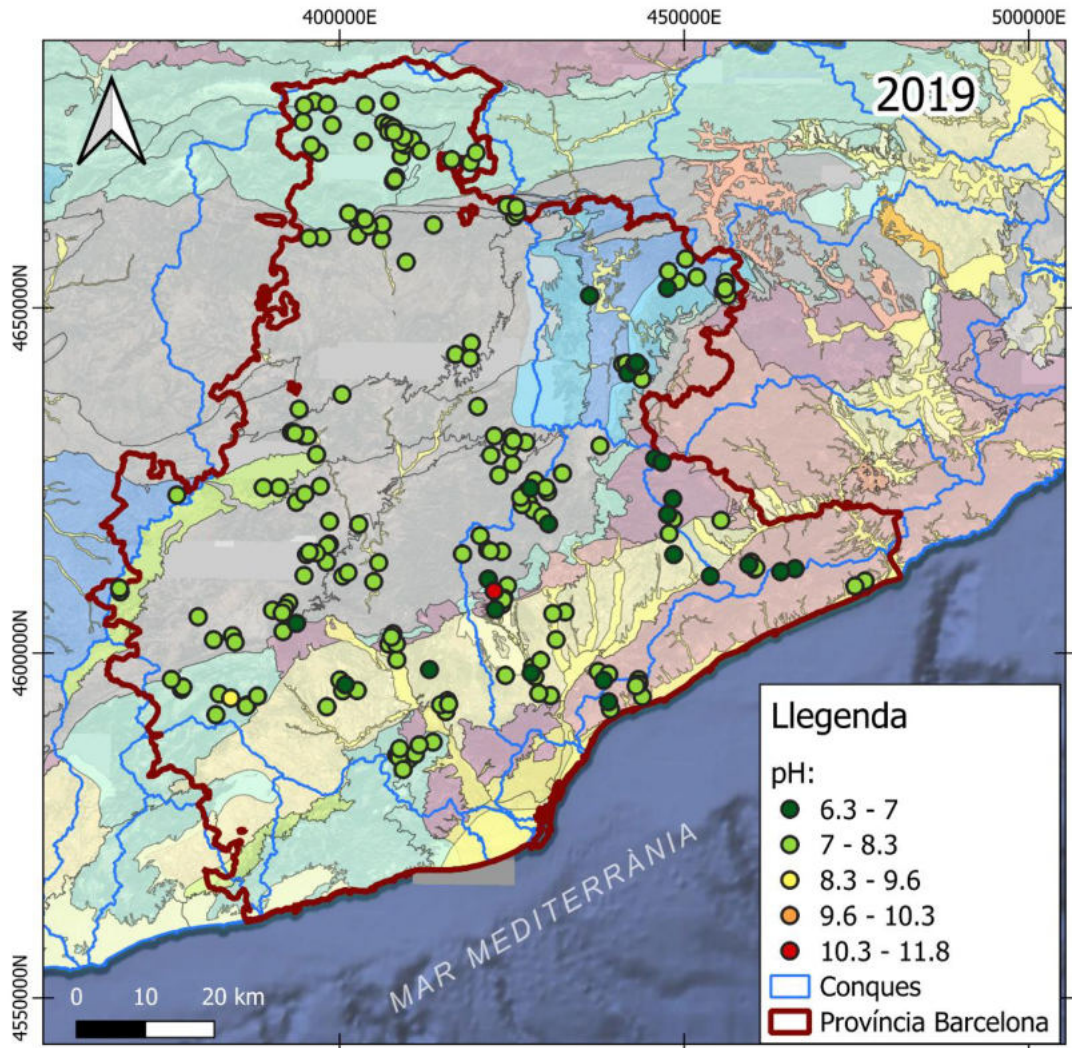


Figura I-11: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2019.

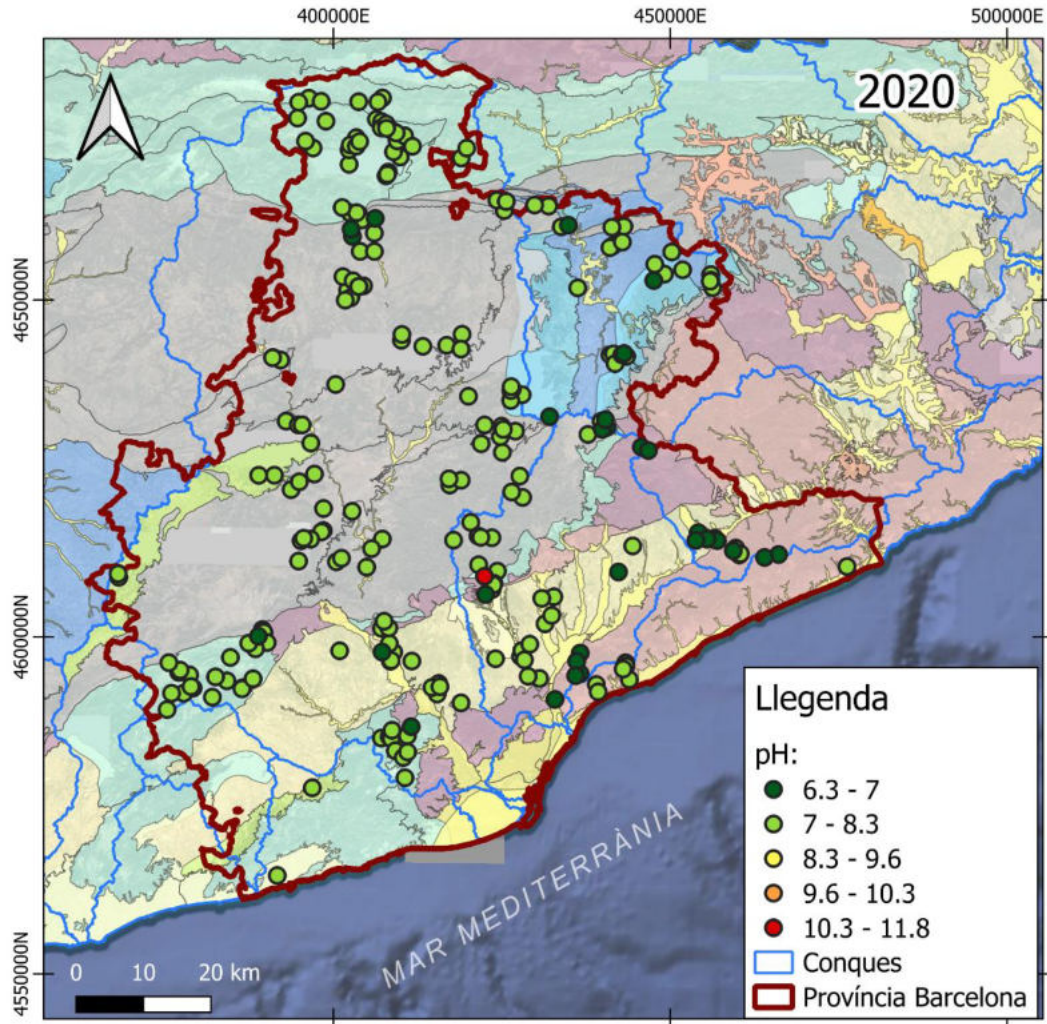


Figura I-12: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2020.

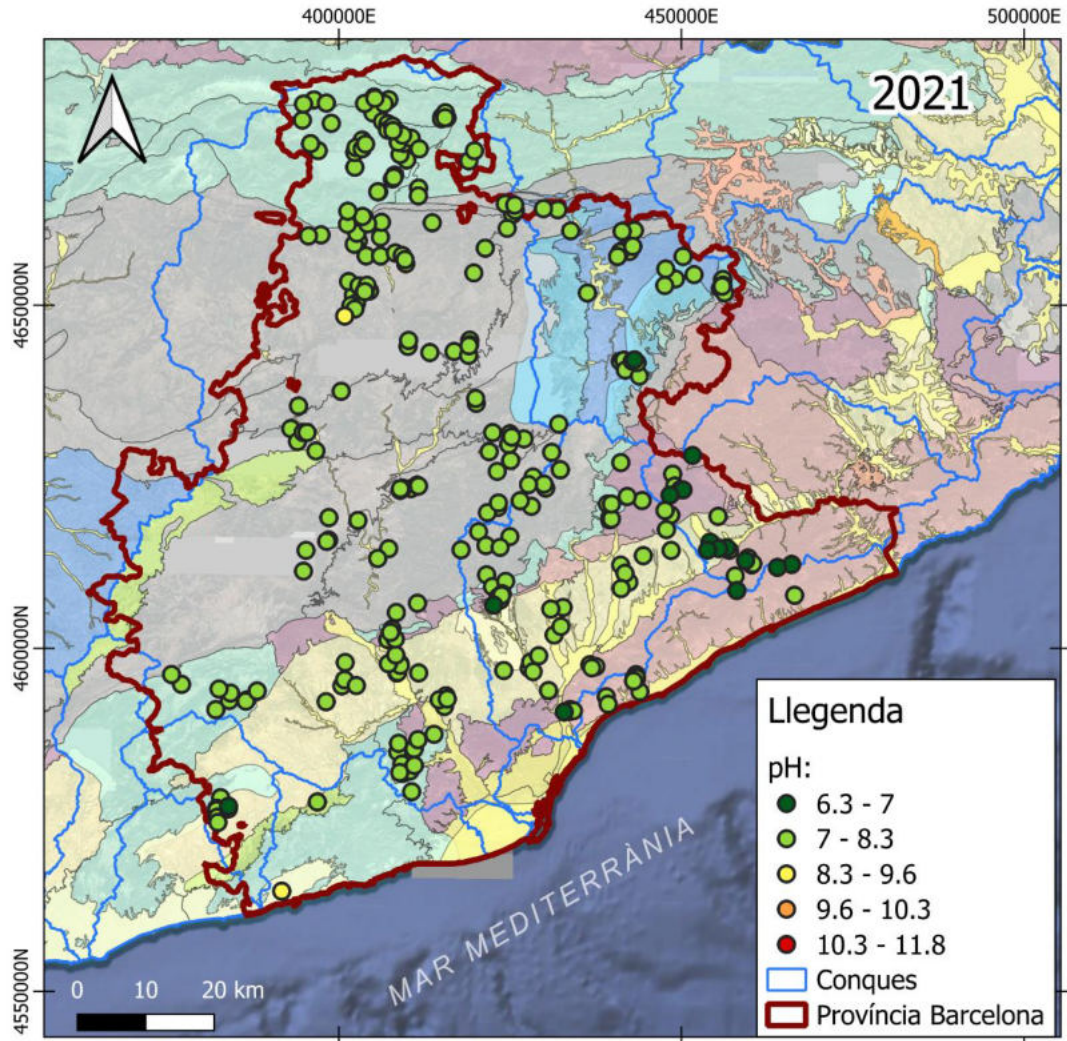


Figura I-13: Distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2021.

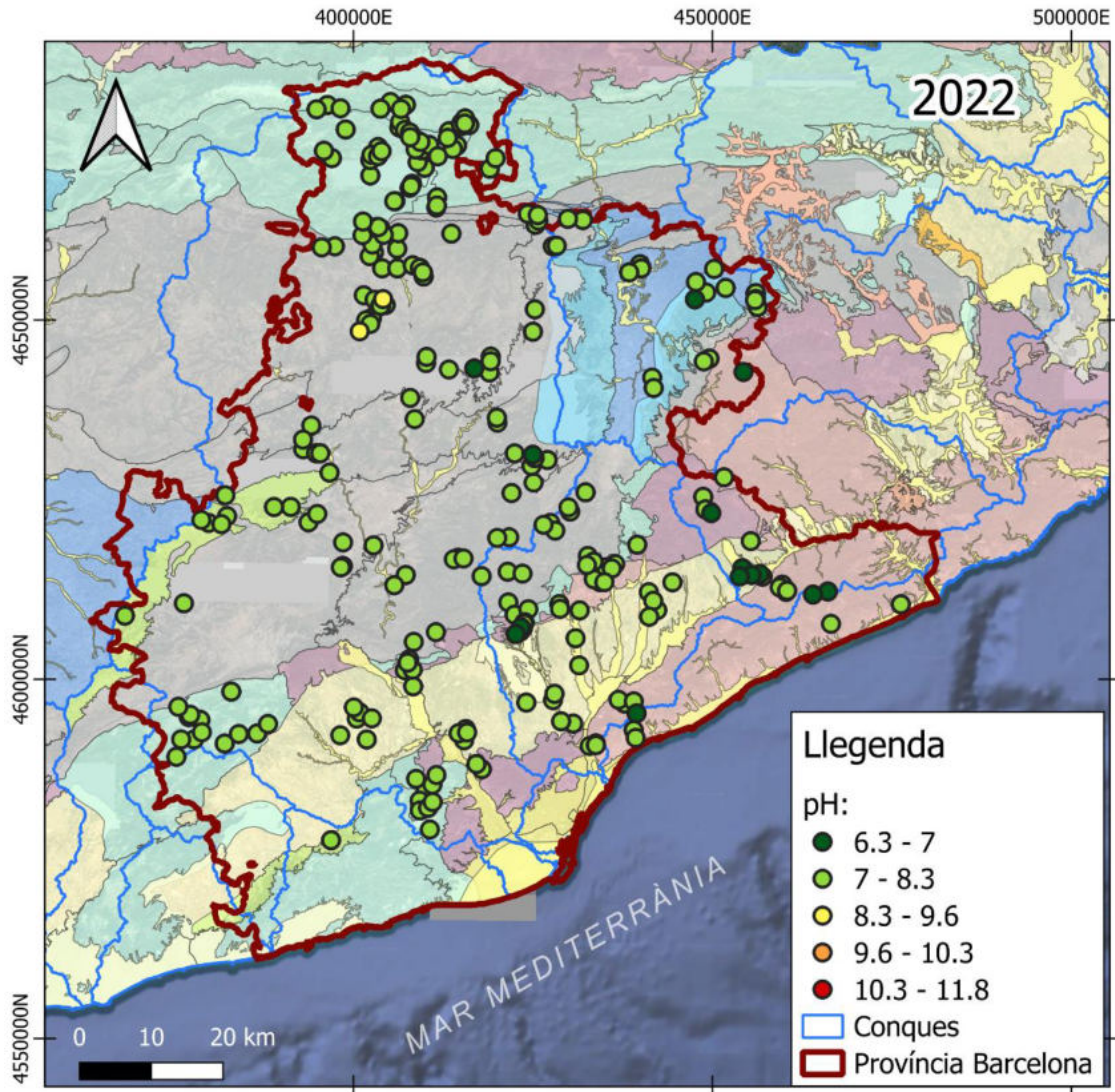


Figura I-14: Evolució de la distribució espacial del pH de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2022.

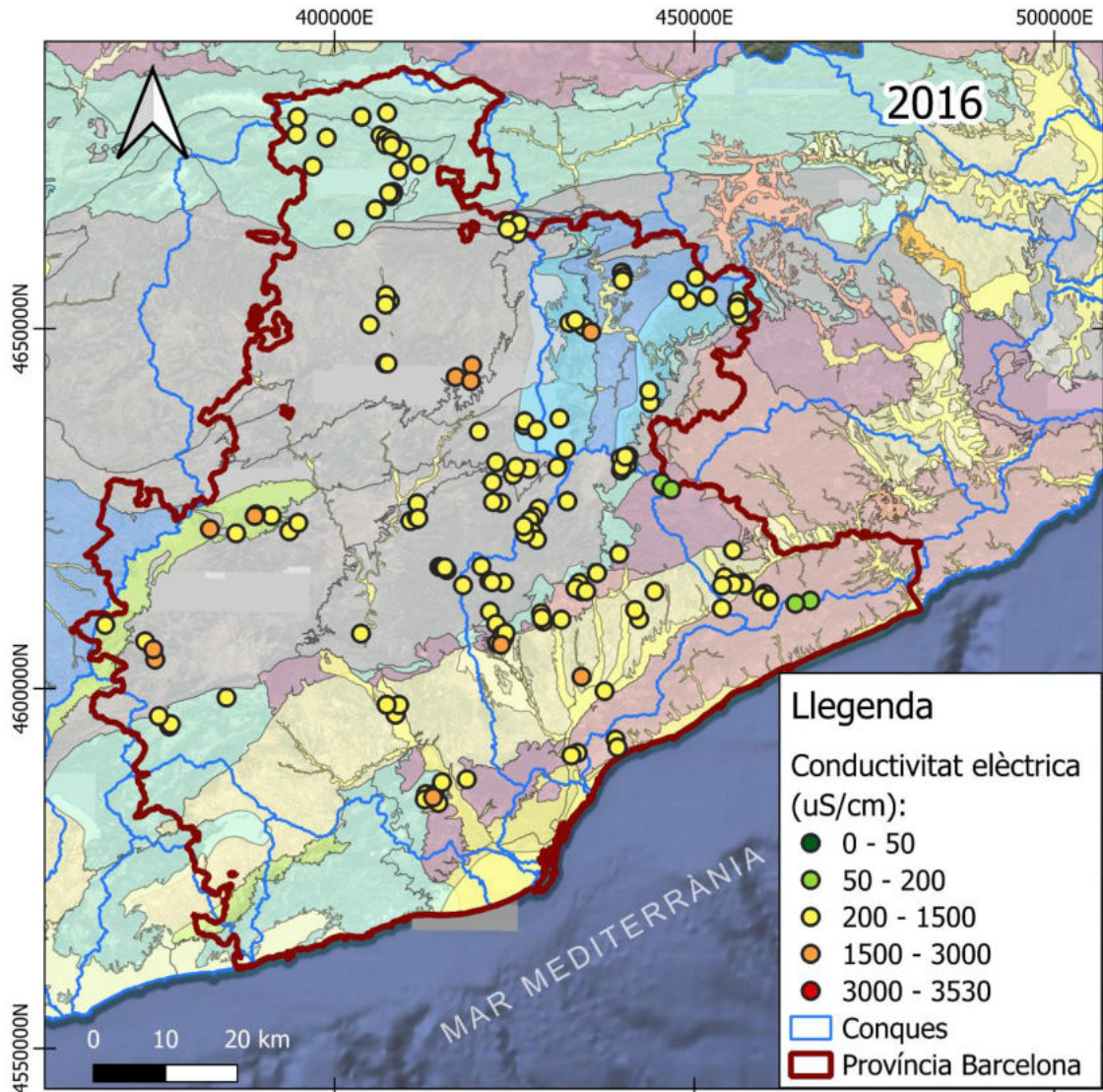


Figura I - 15: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2016.

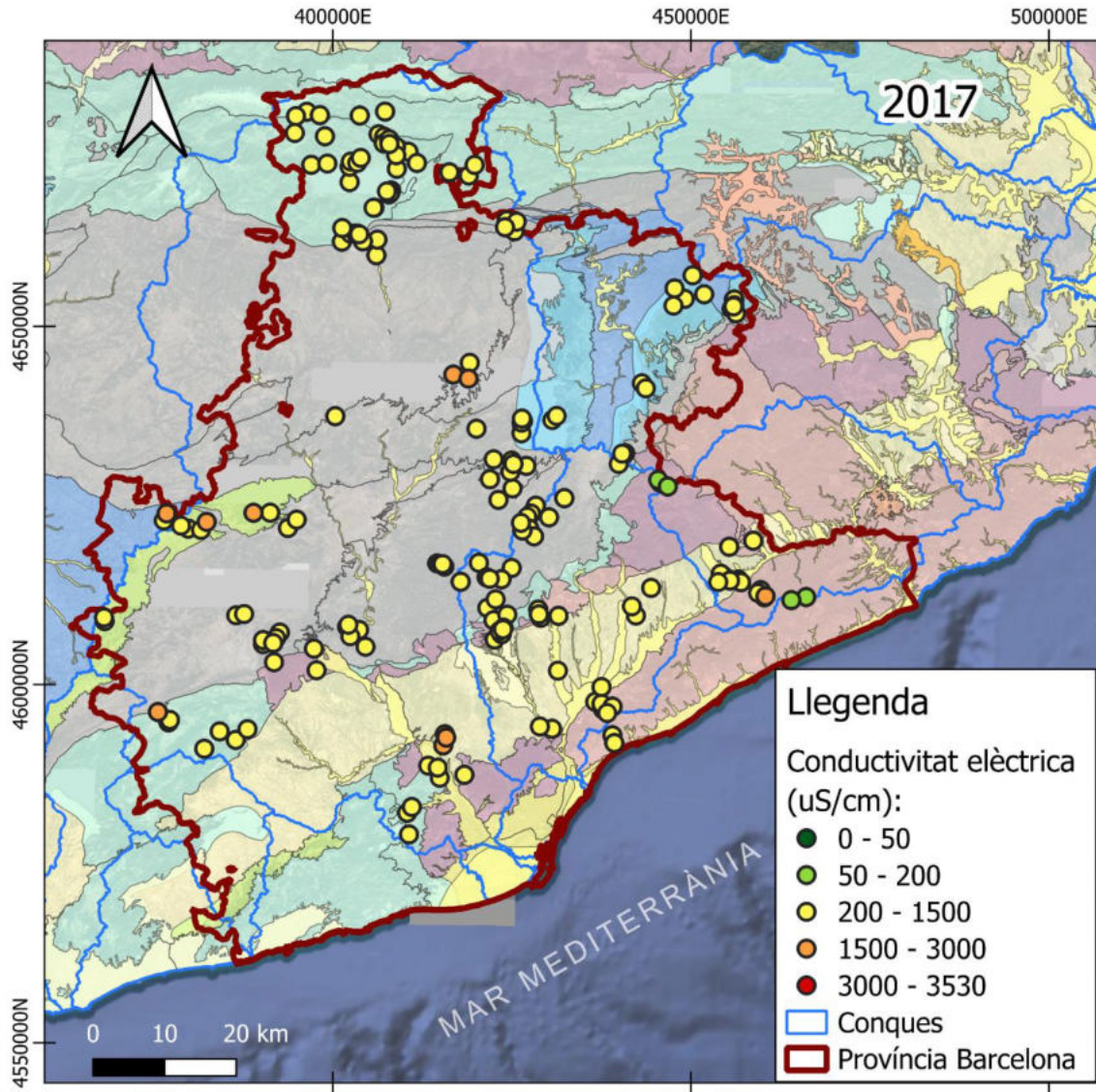


Figura I - 16: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2017.

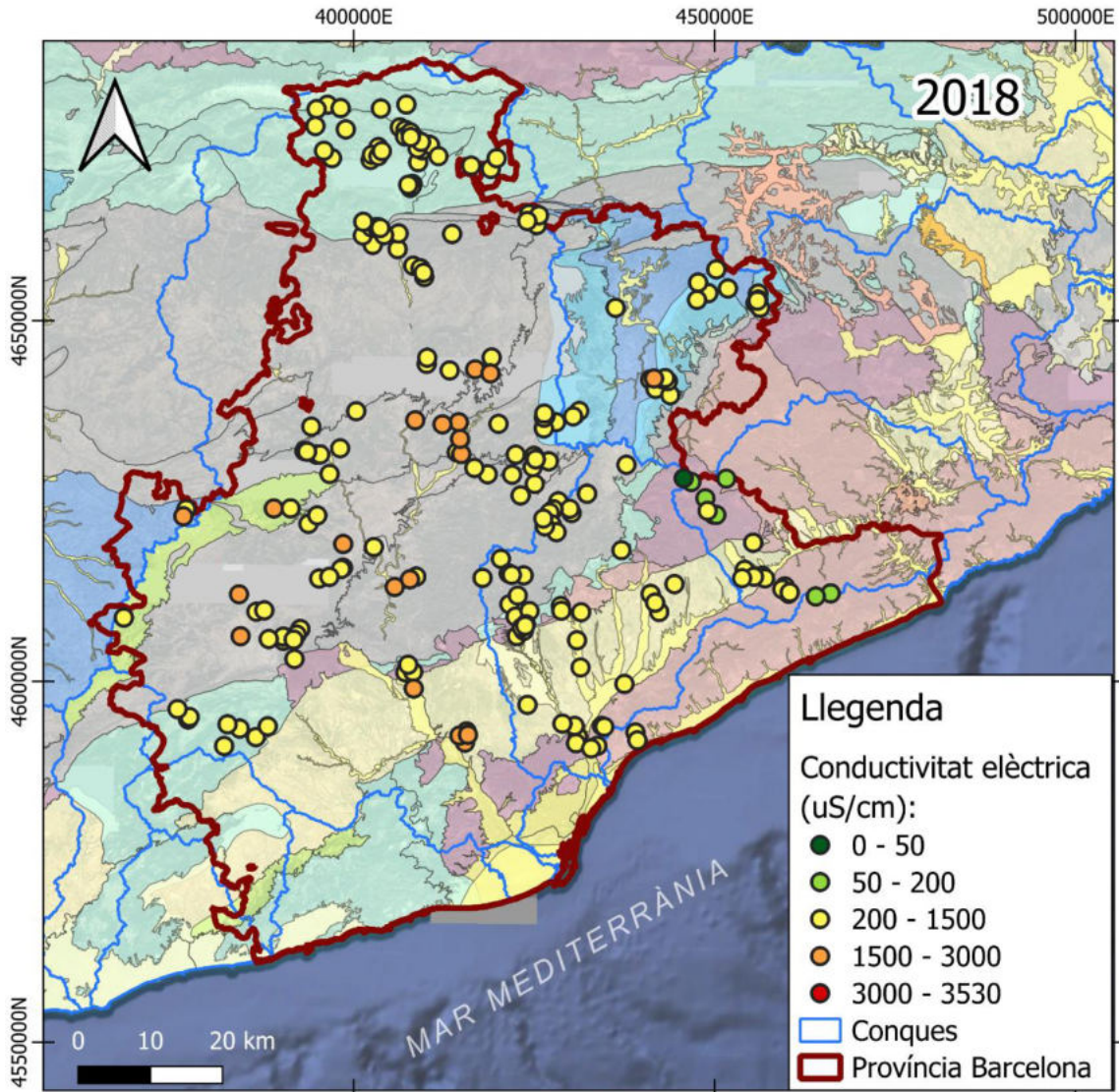


Figura I - 17: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

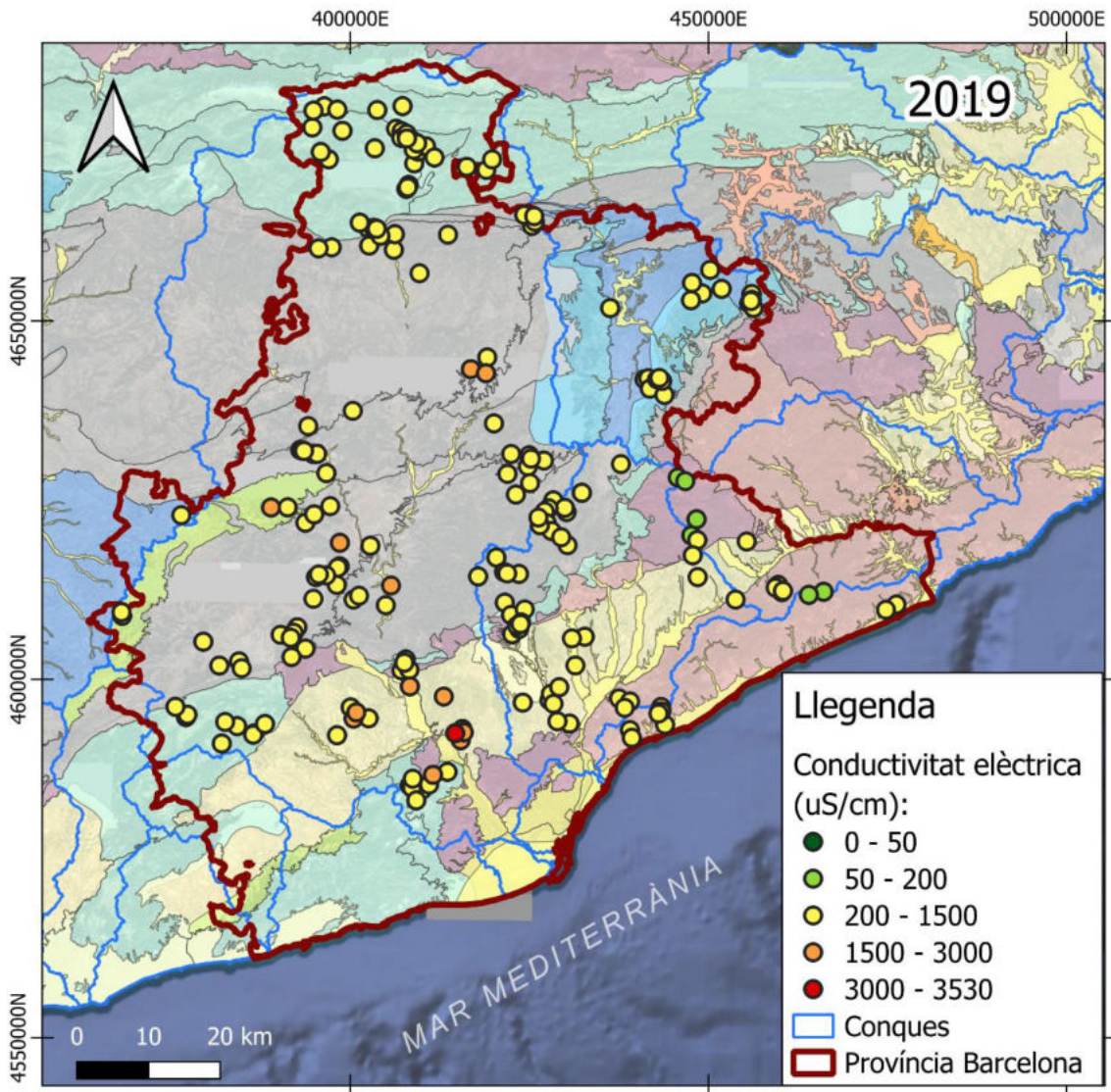


Figura I - 18: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2019.

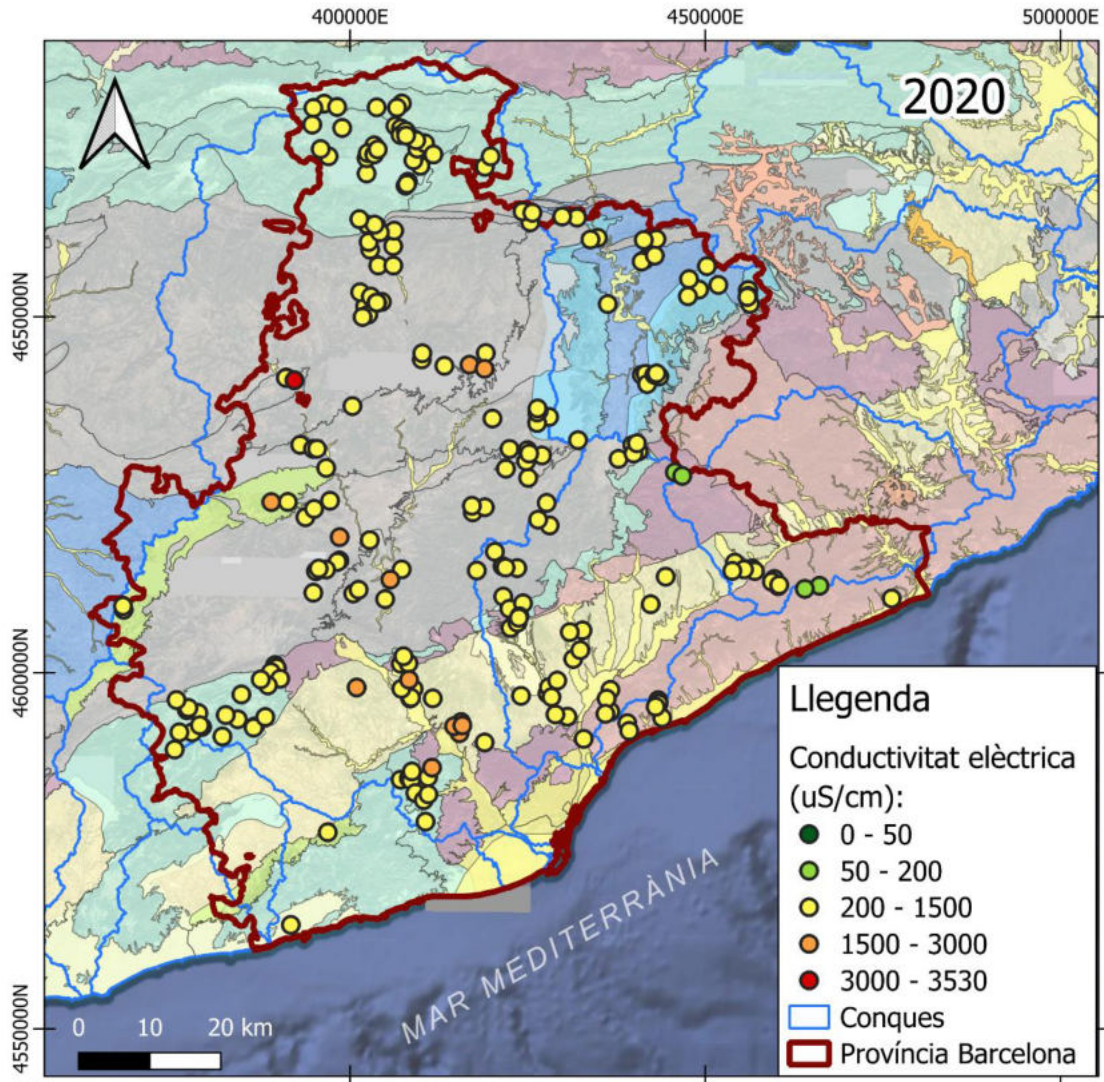


Figura I - 19: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2020.

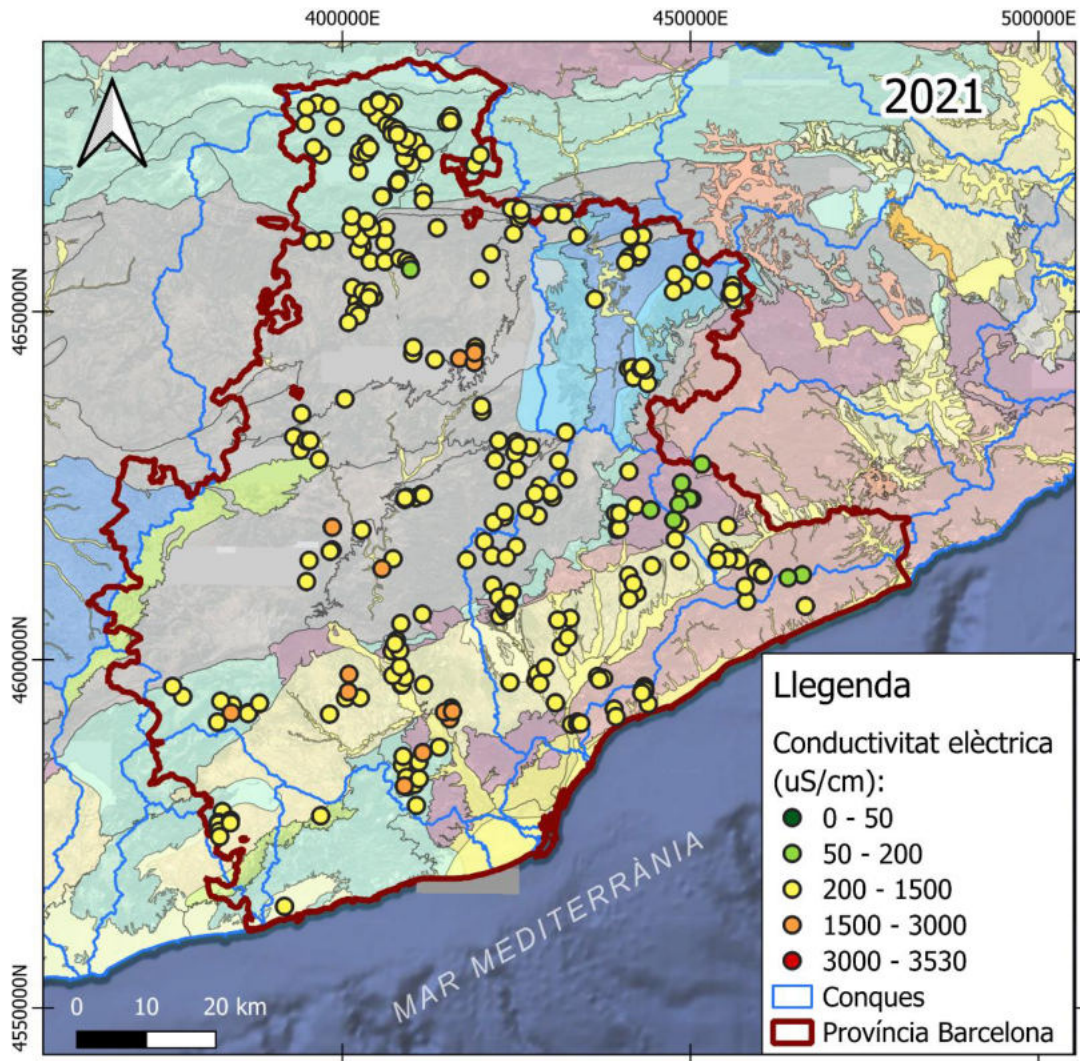


Figura I - 20: Distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2021.

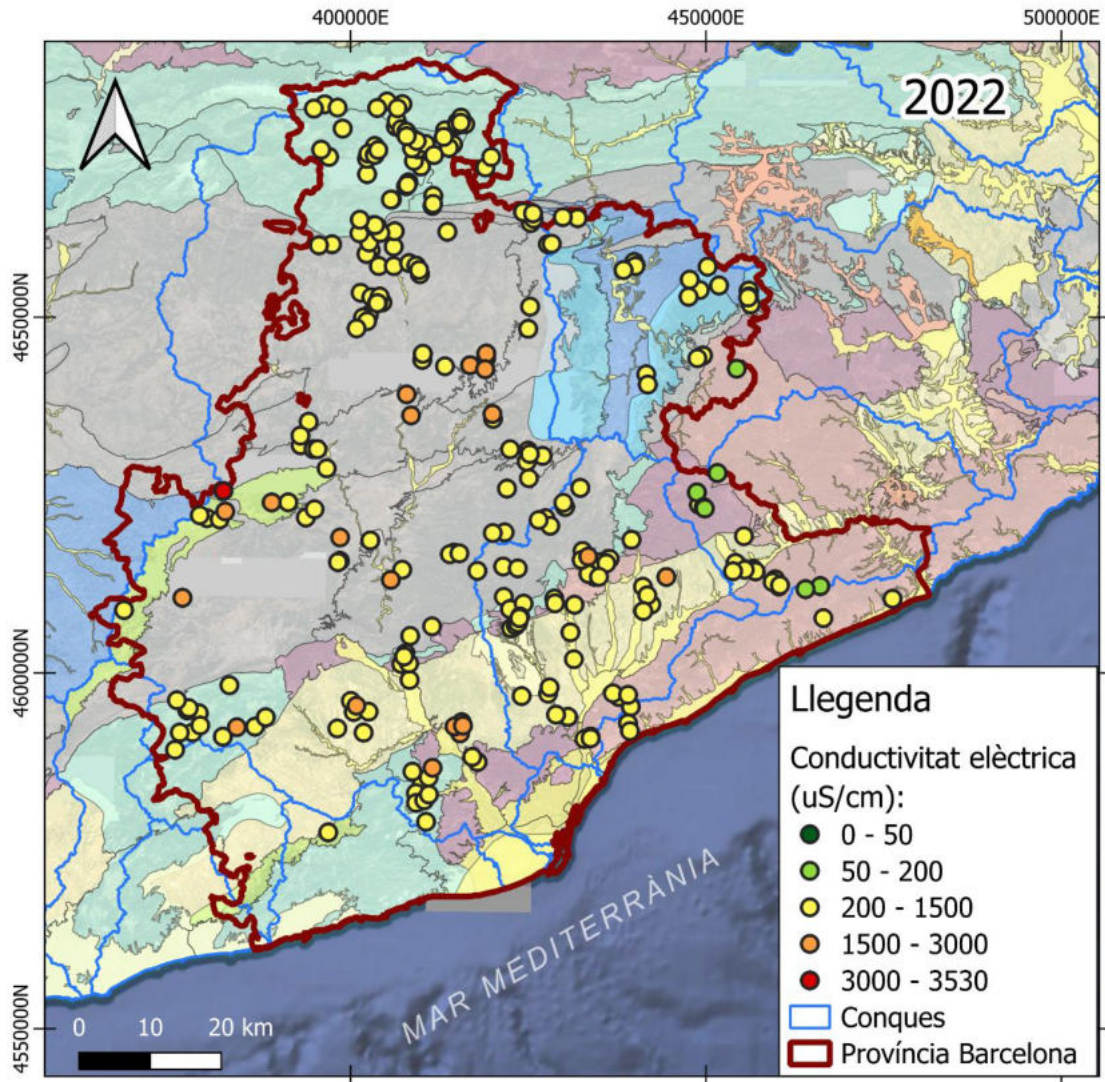


Figura I - 21: Evolució de la distribució espacial de la conductivitat elèctrica (uS/cm) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2022.

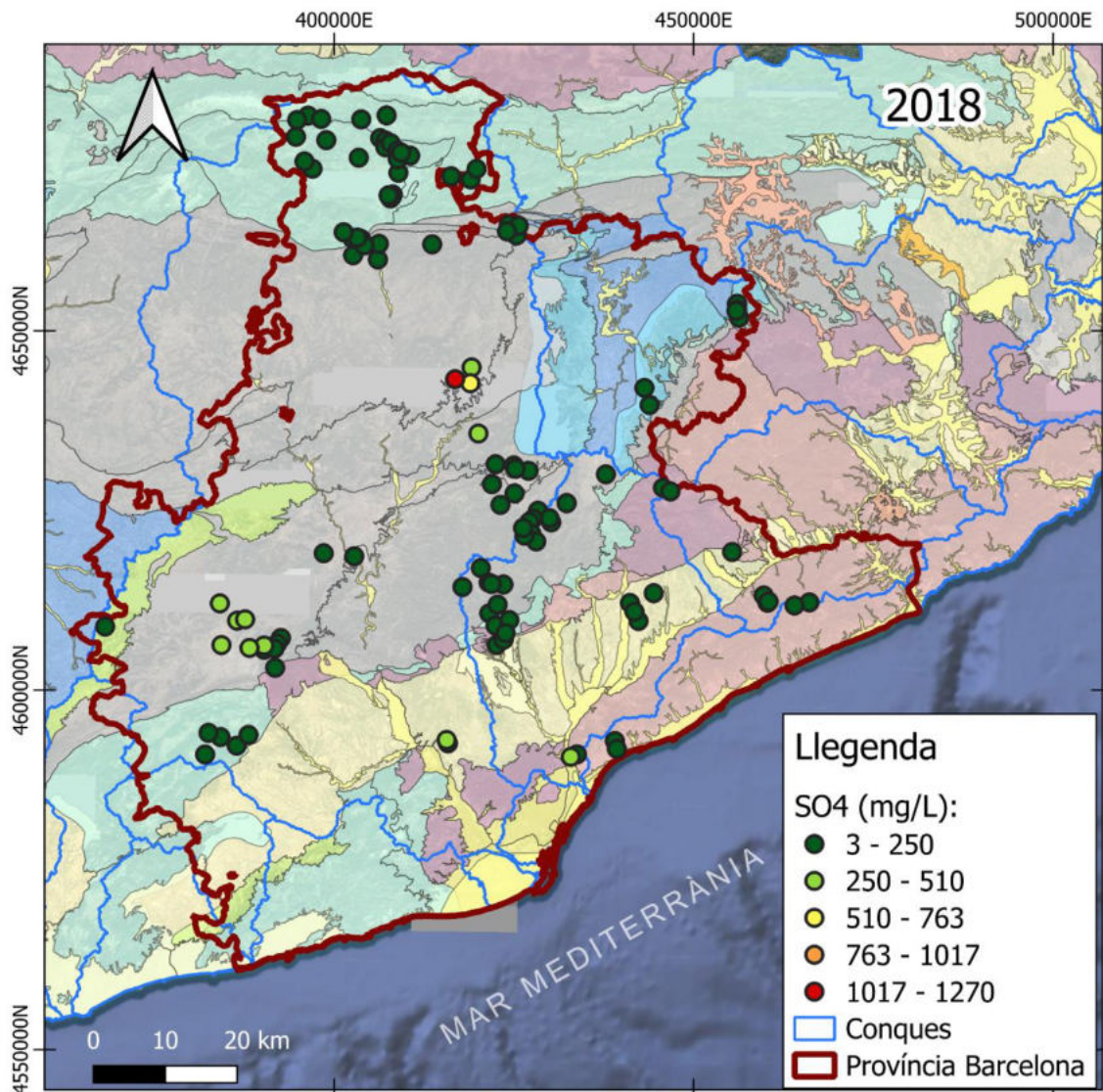


Figura I-22: Distribució espacial de la concentració de SO₄ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

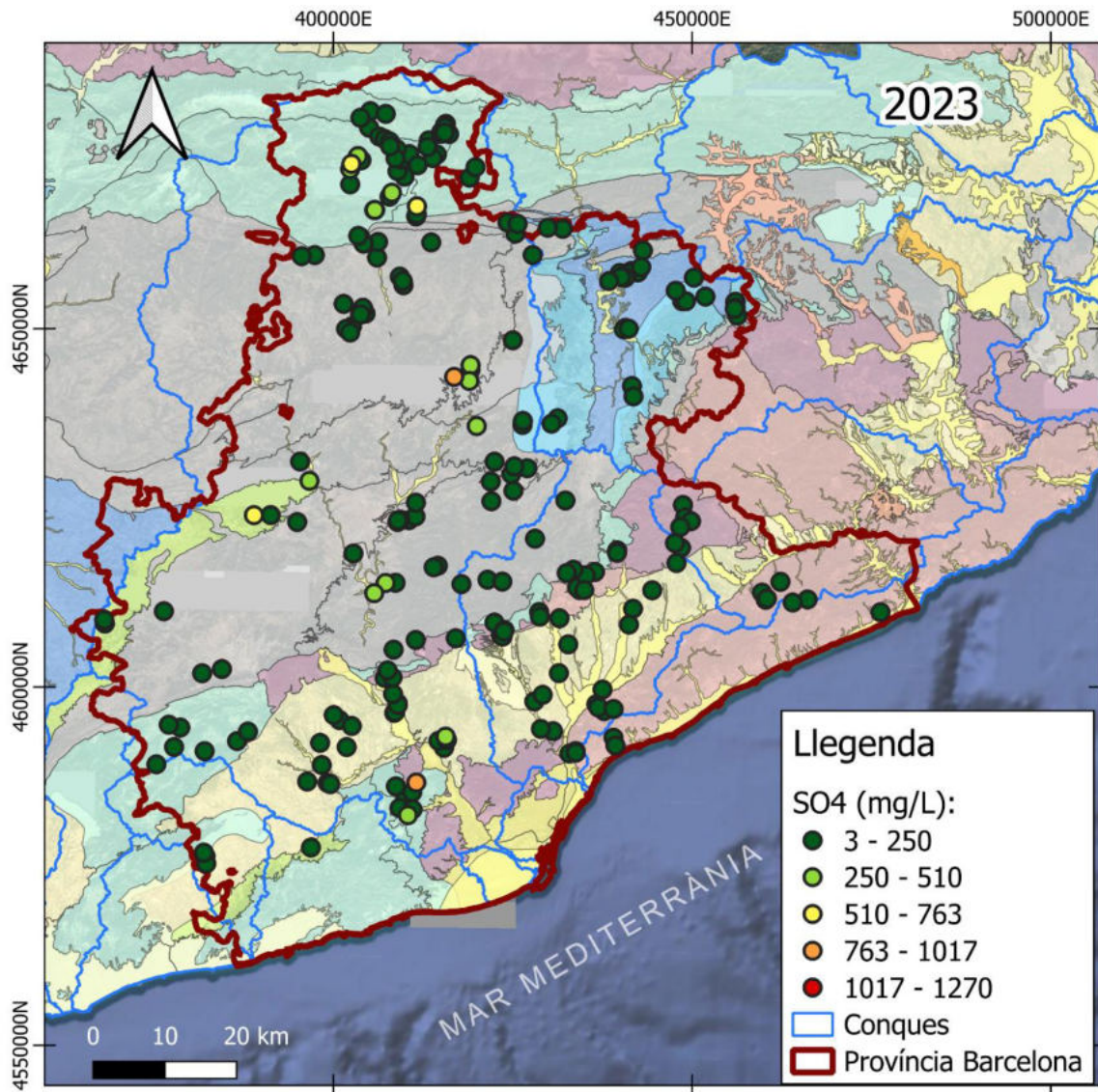


Figura I-23: Distribució espacial de la concentració de SO₄ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2023.

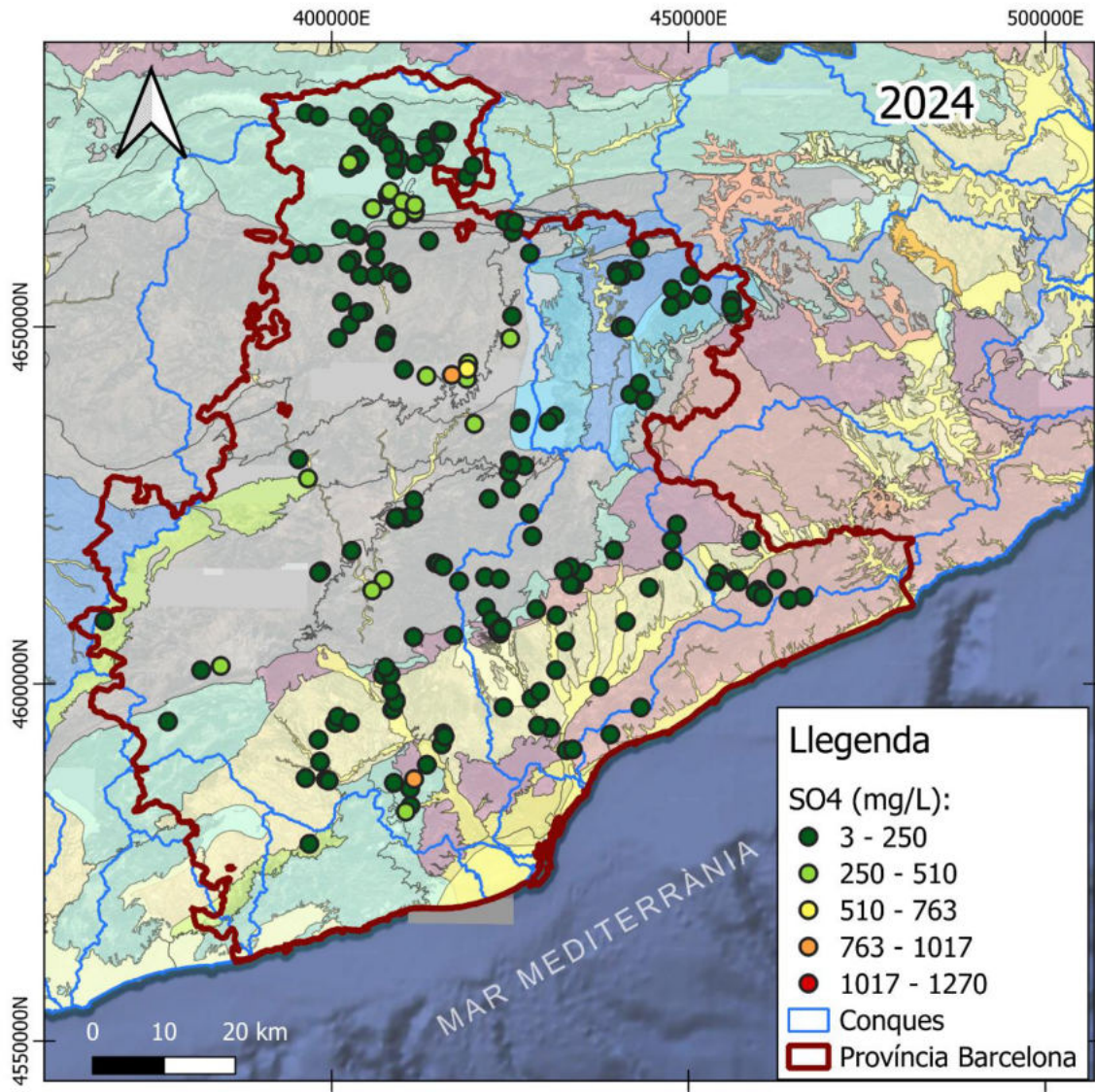


Figura I-24: Distribució espacial de la concentració de SO₄ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2024.

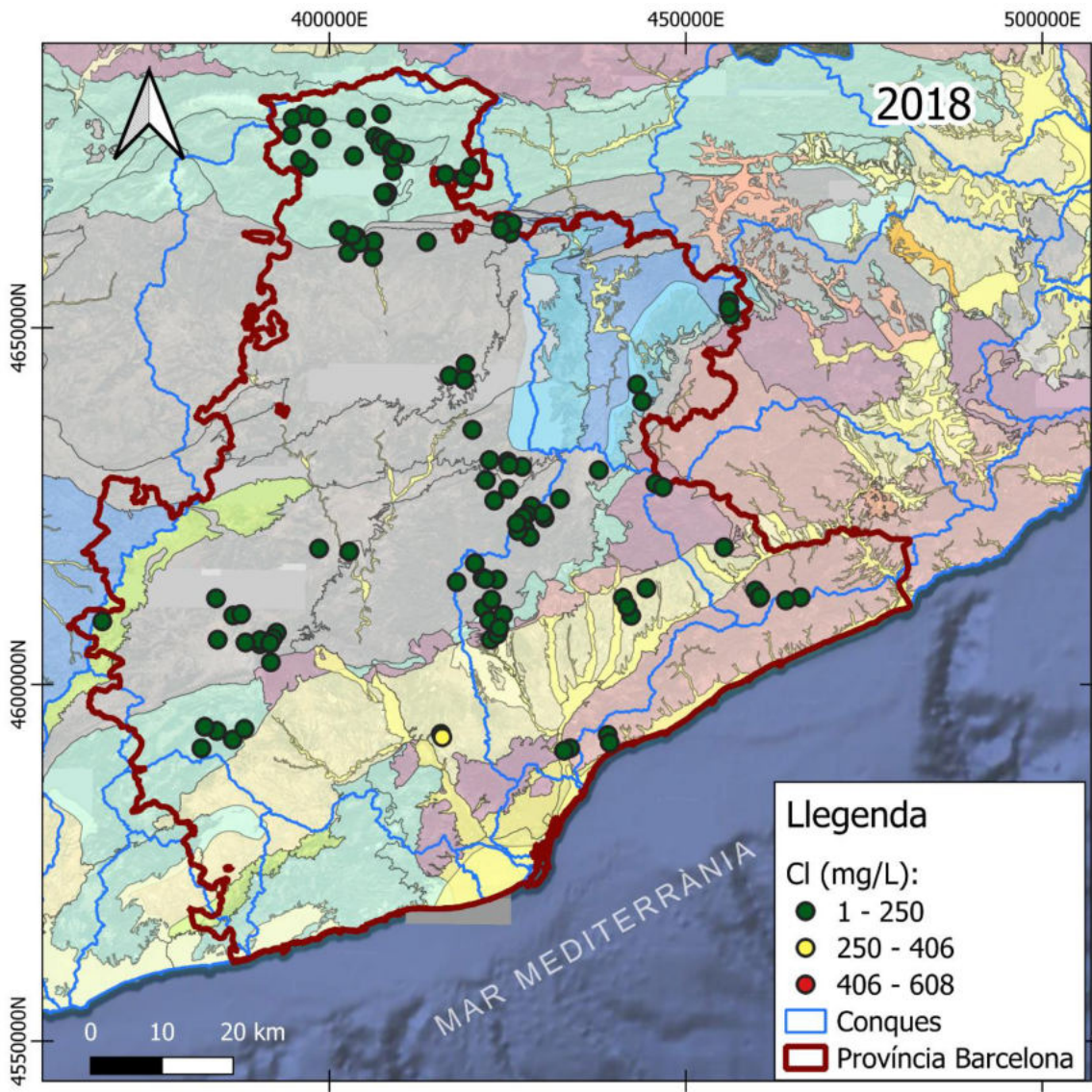


Figura I - 25: Distribució espacial de la concentració de Cl⁻ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

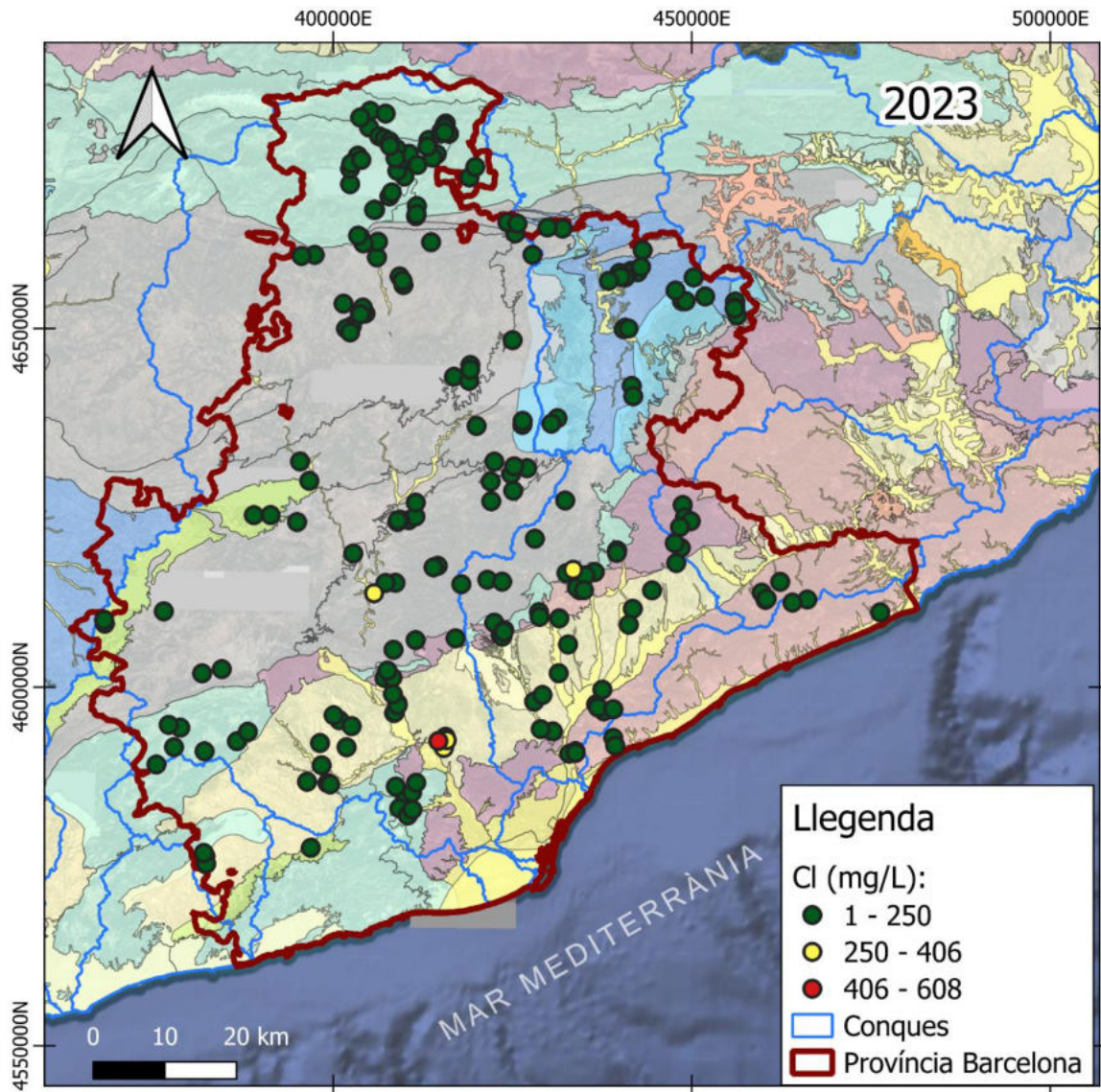


Figura I - 26: Distribució espacial de la concentració de Cl^- (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2023.

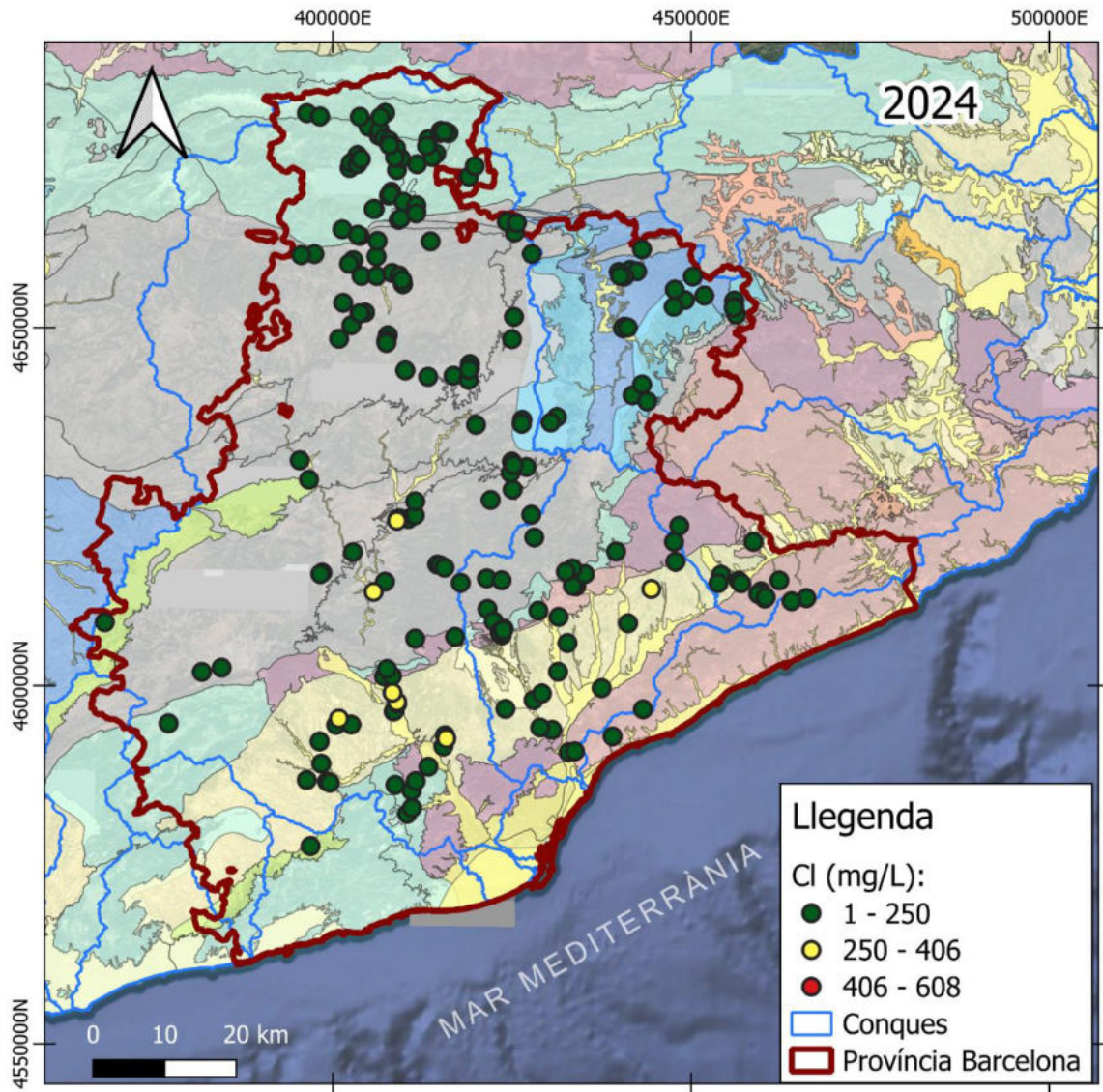


Figura I - 27: Distribució espacial de la concentració de Cl⁻ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2024.

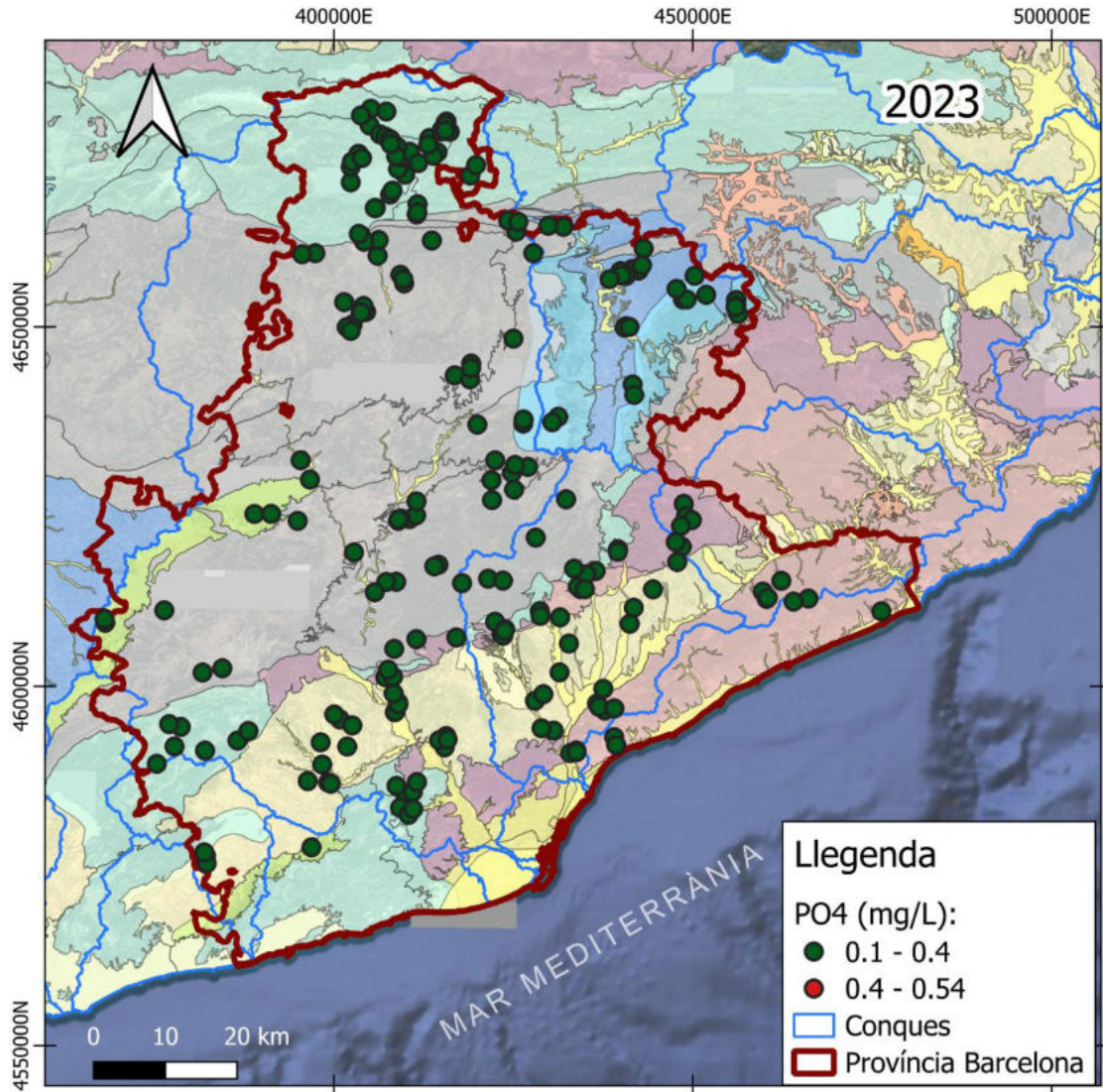


Figura I - 28: Distribució espacial de la concentració de PO₄ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2023.

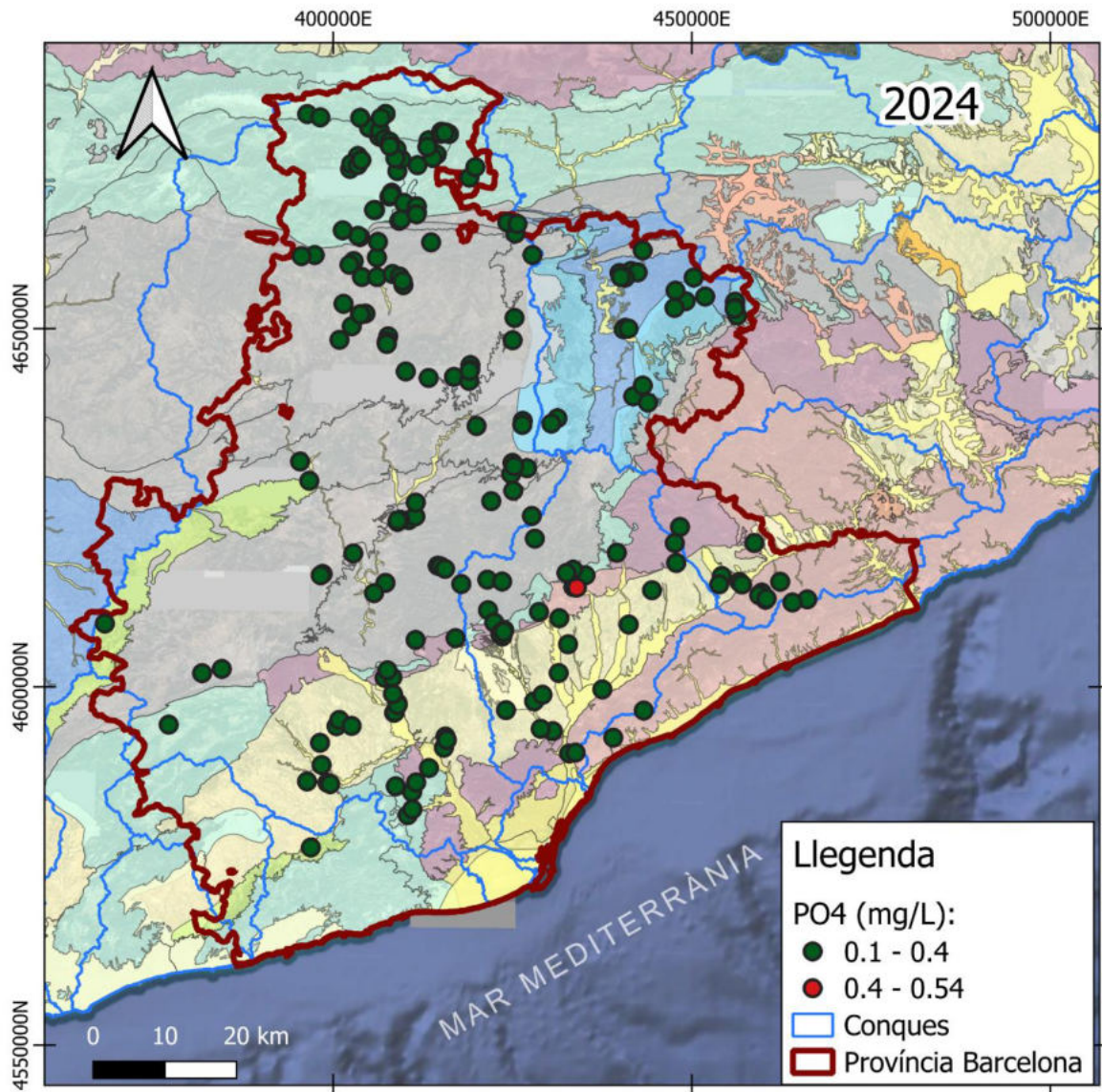


Figura I - 29: Distribució espacial de la concentració de PO₄ (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2024.

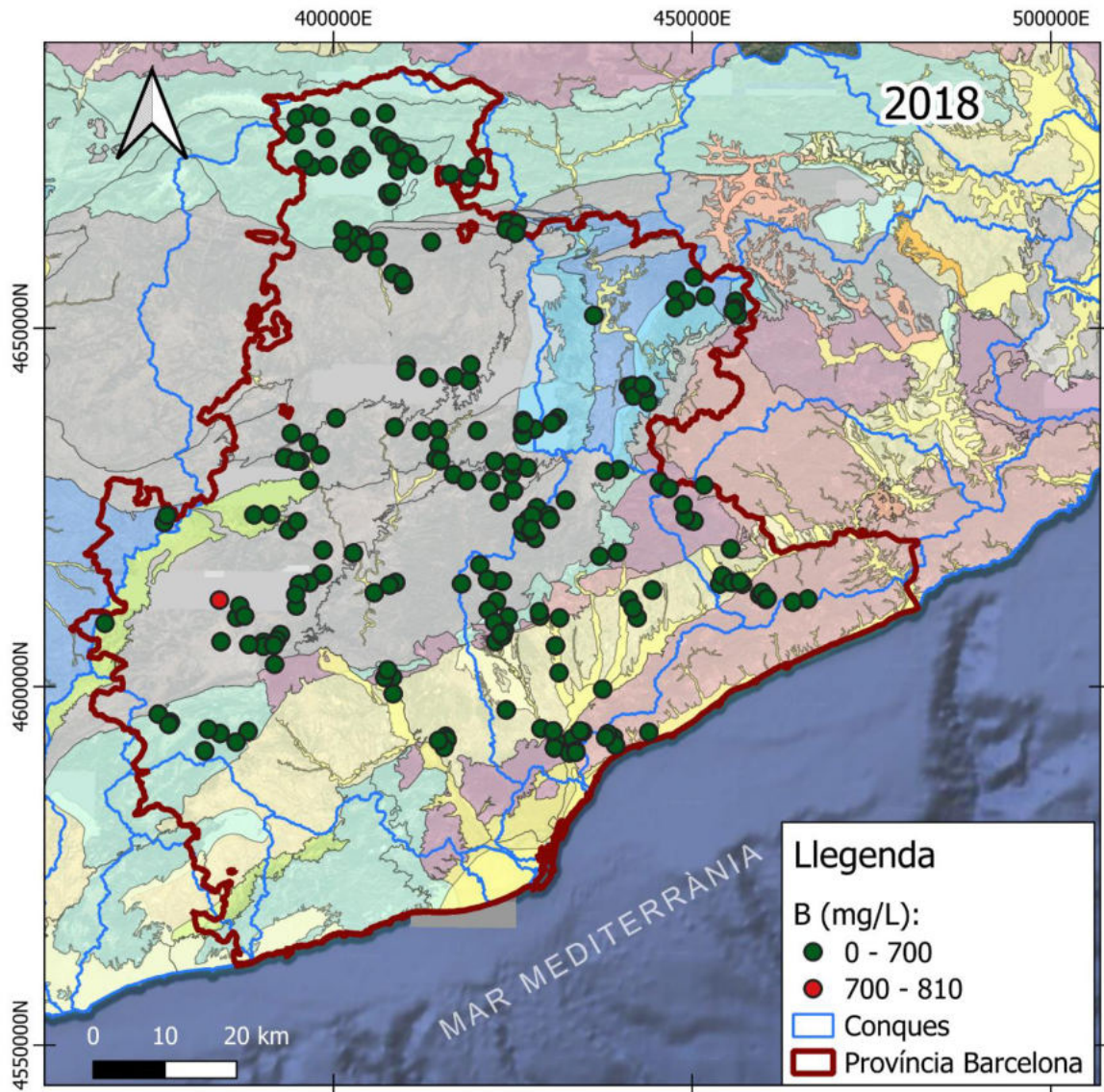


Figura I - 30: Distribució espacial de la concentració de B (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

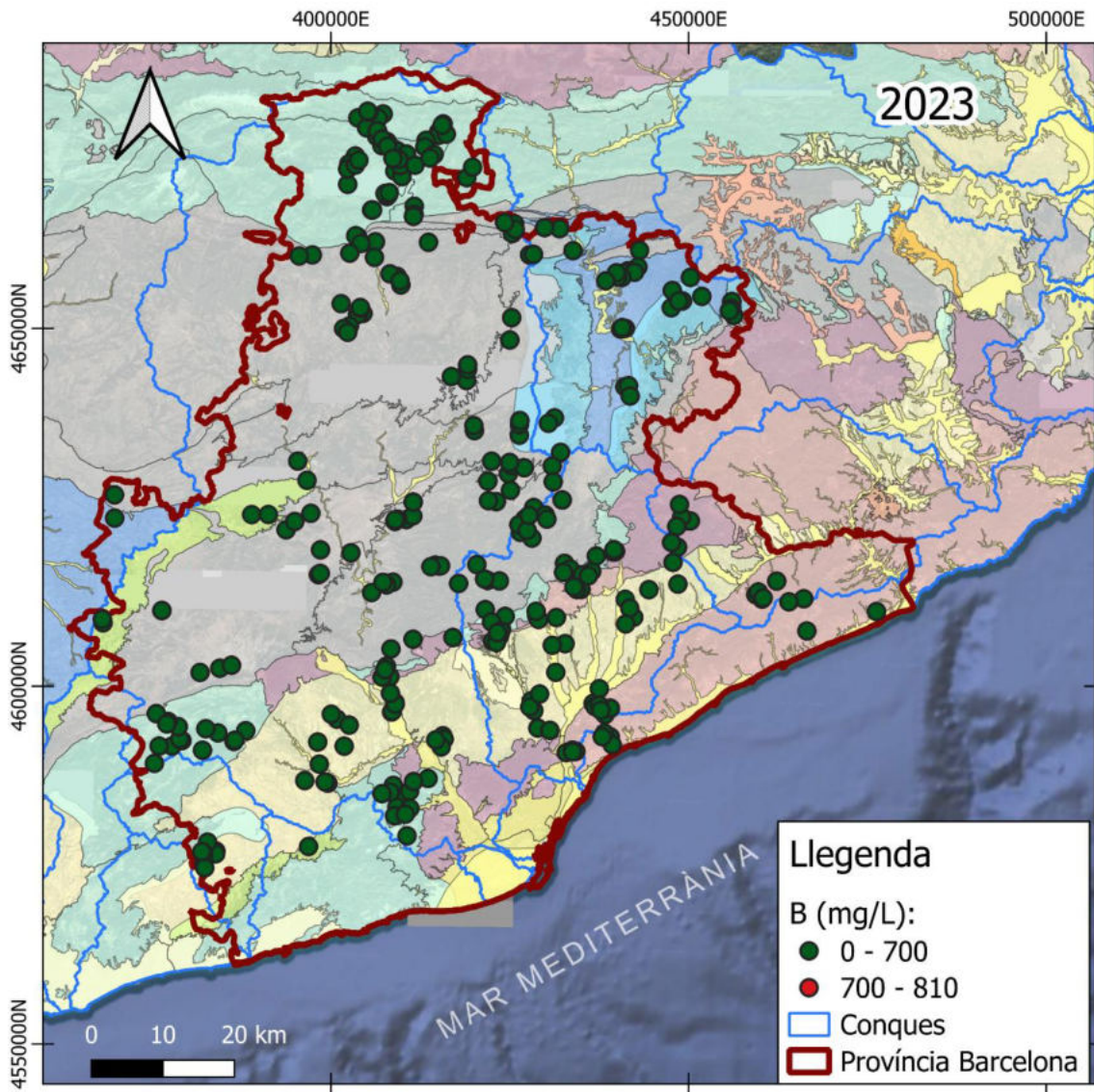


Figura I - 31: Distribució espacial de la concentració de B (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2023.

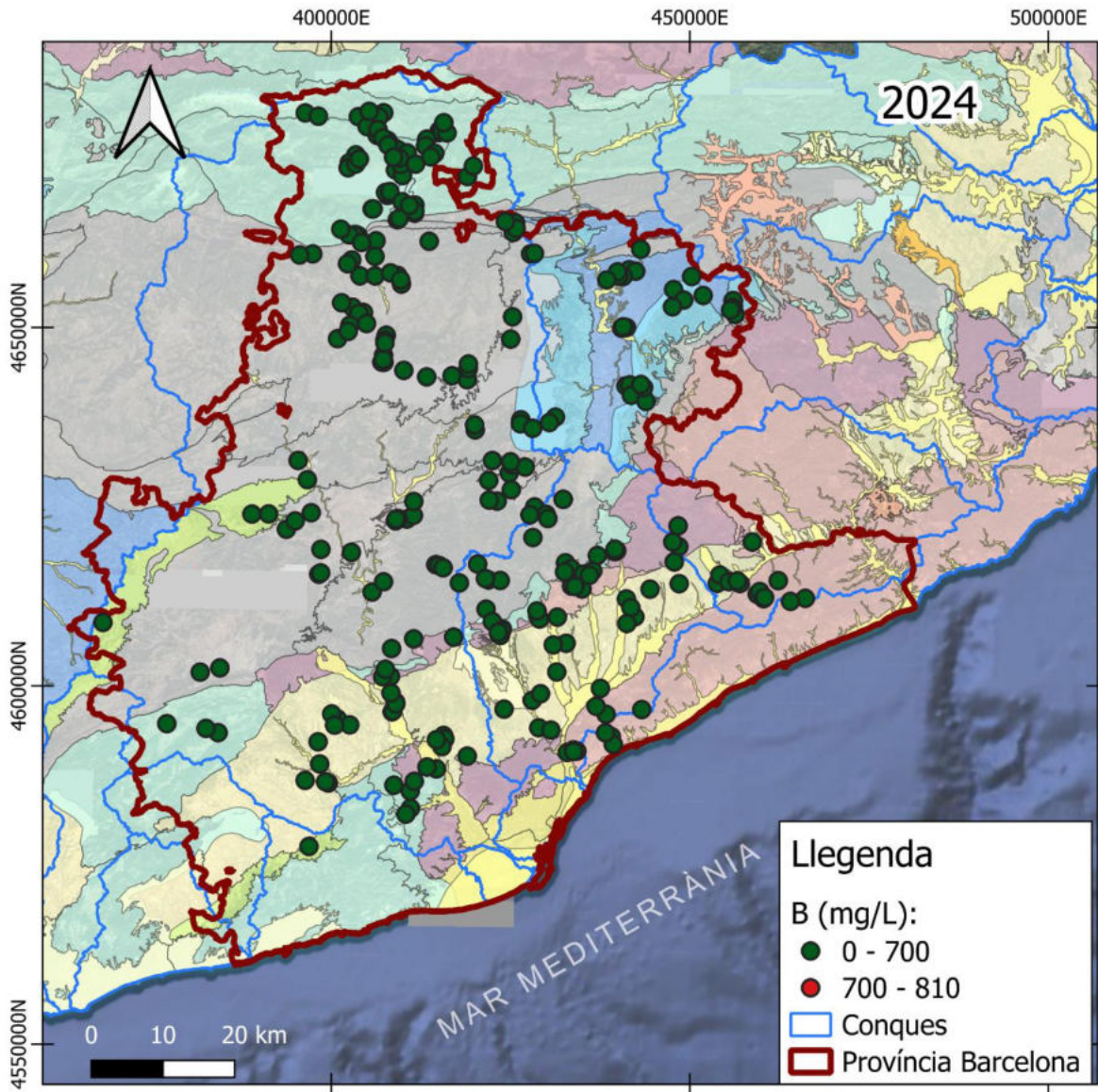


Figura I - 32: Distribució espacial de la concentració de B (mg/L) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2024.

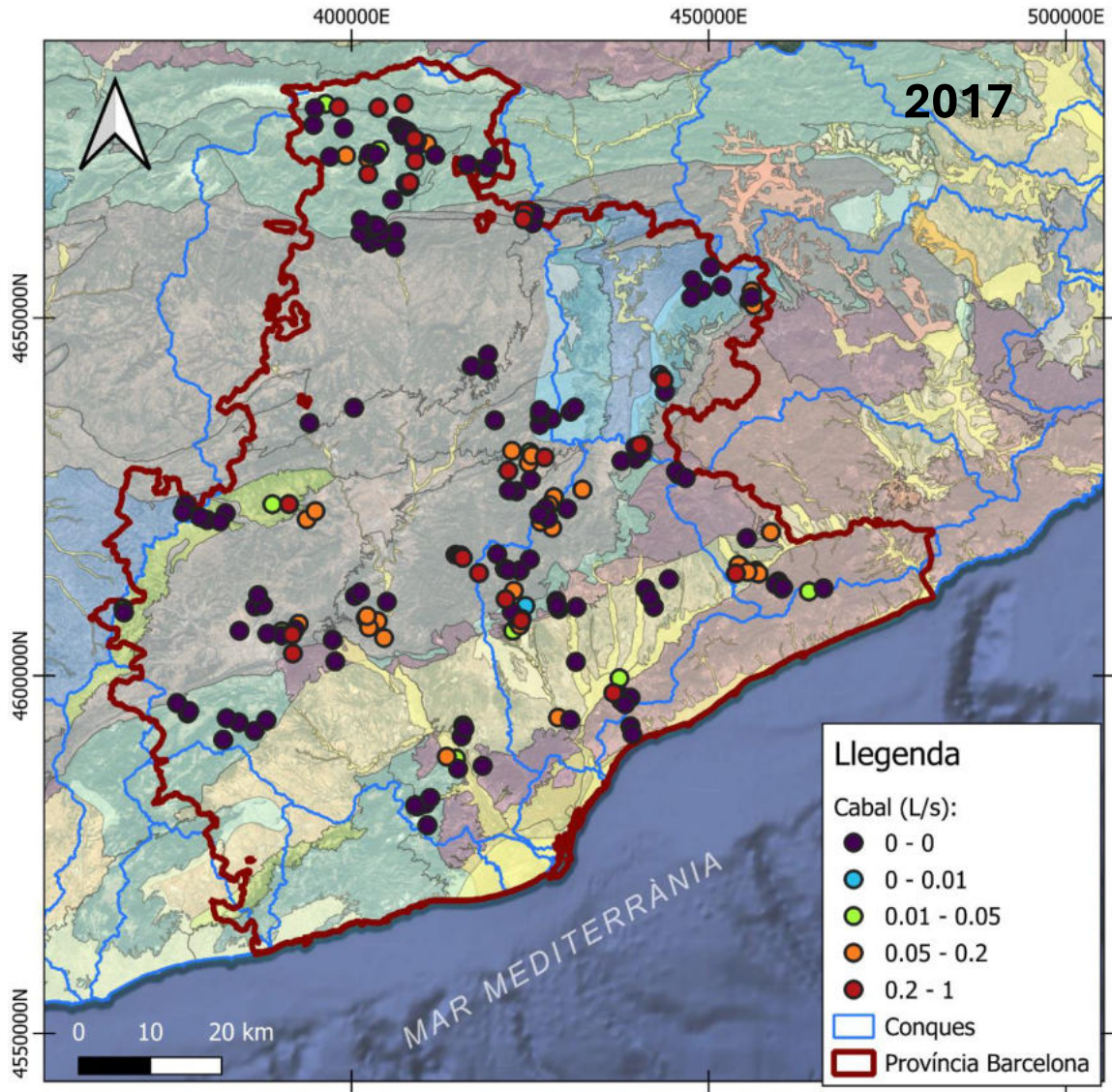


Figura I - 33: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2017.

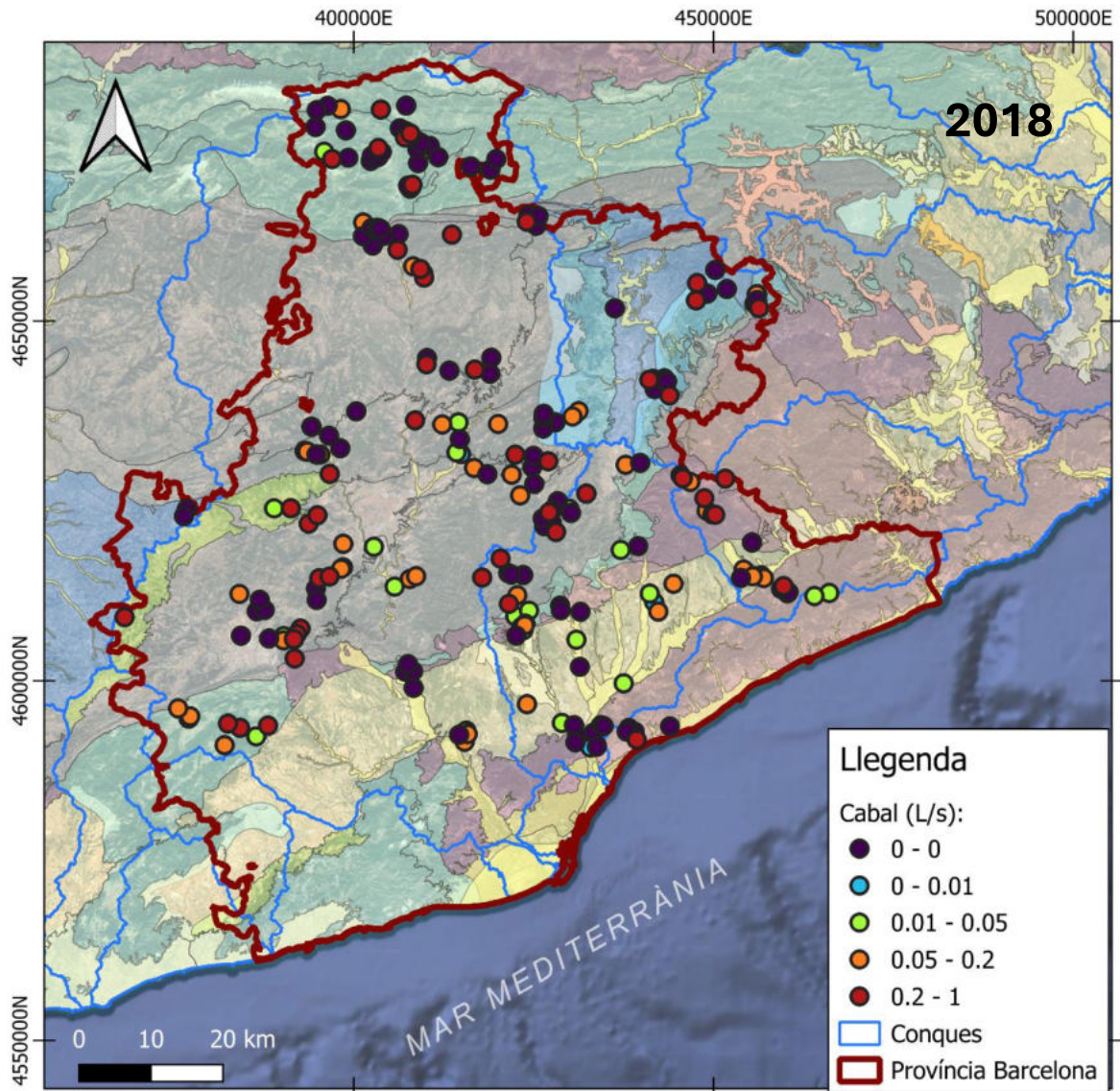


Figura I - 34: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2018.

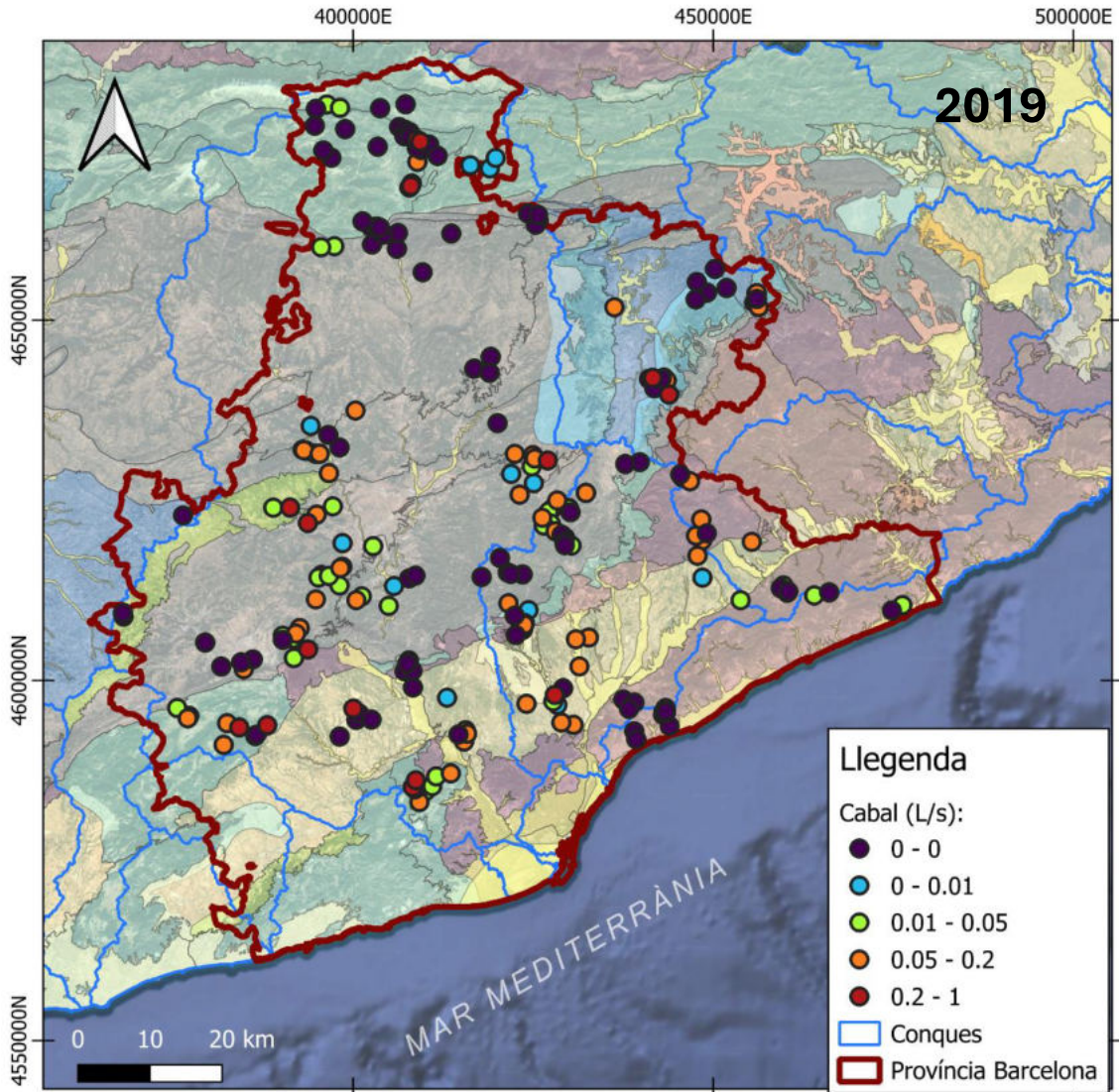


Figura 1 - 35: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2019.

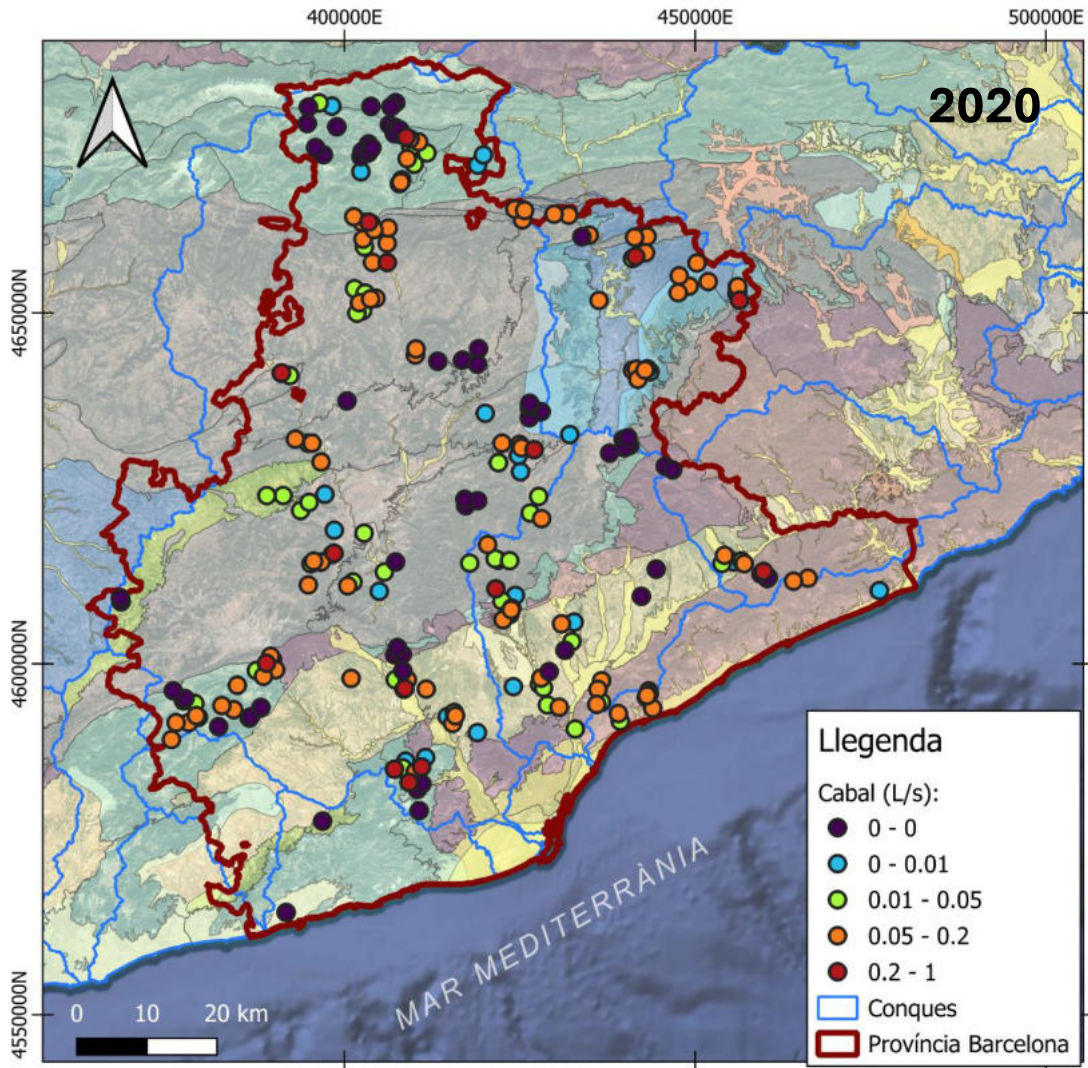


Figura I - 36: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2020.

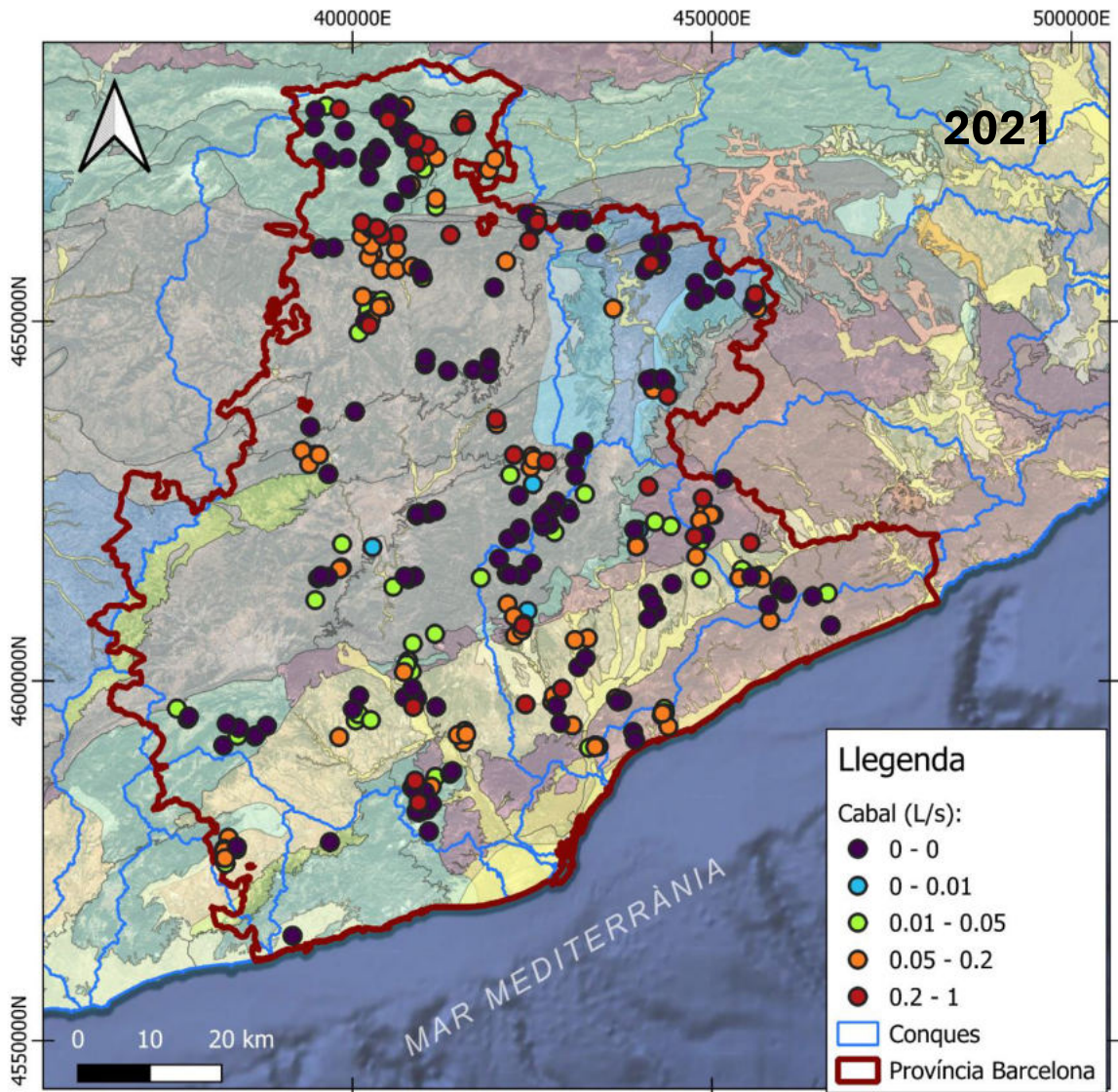


Figura I - 37: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2021.

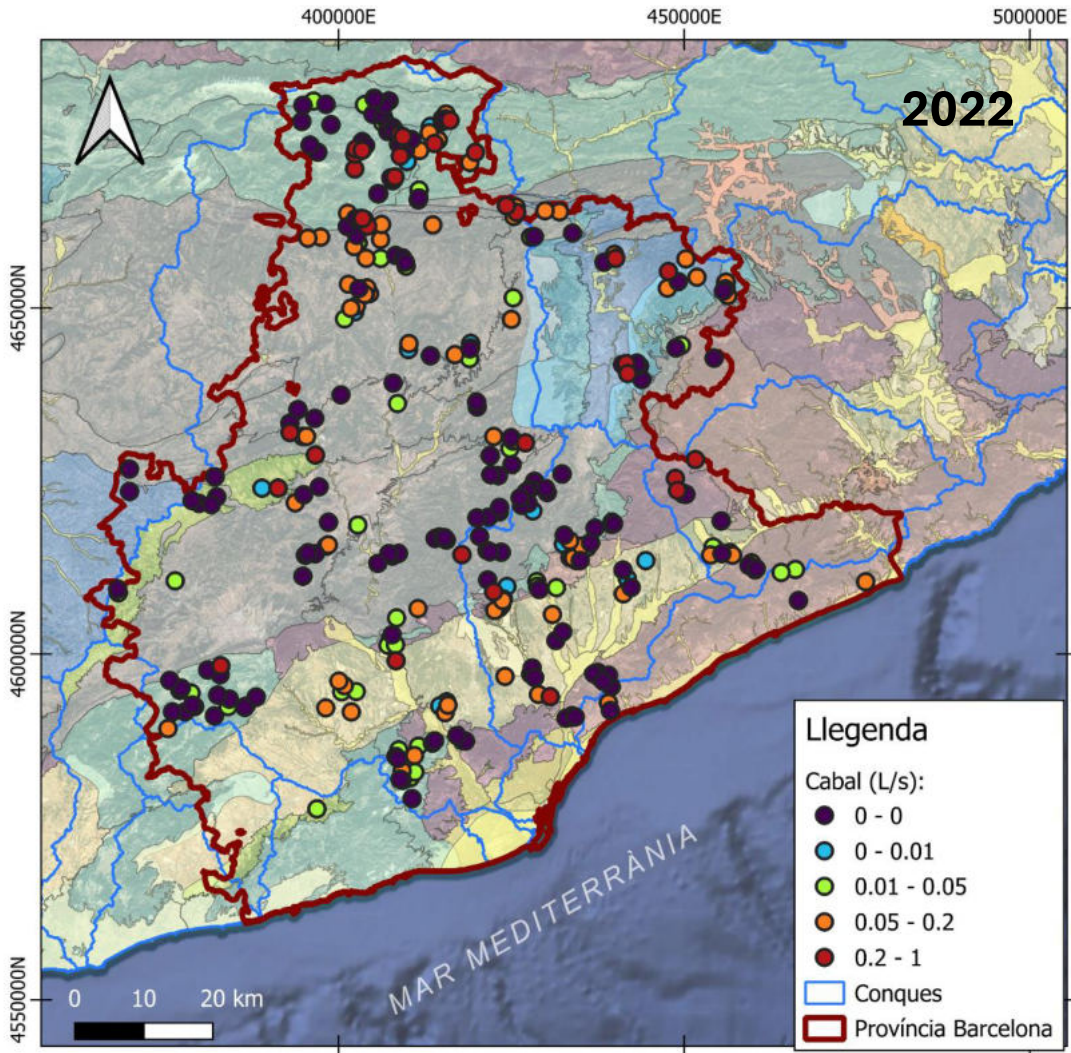


Figura I - 38: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2022.

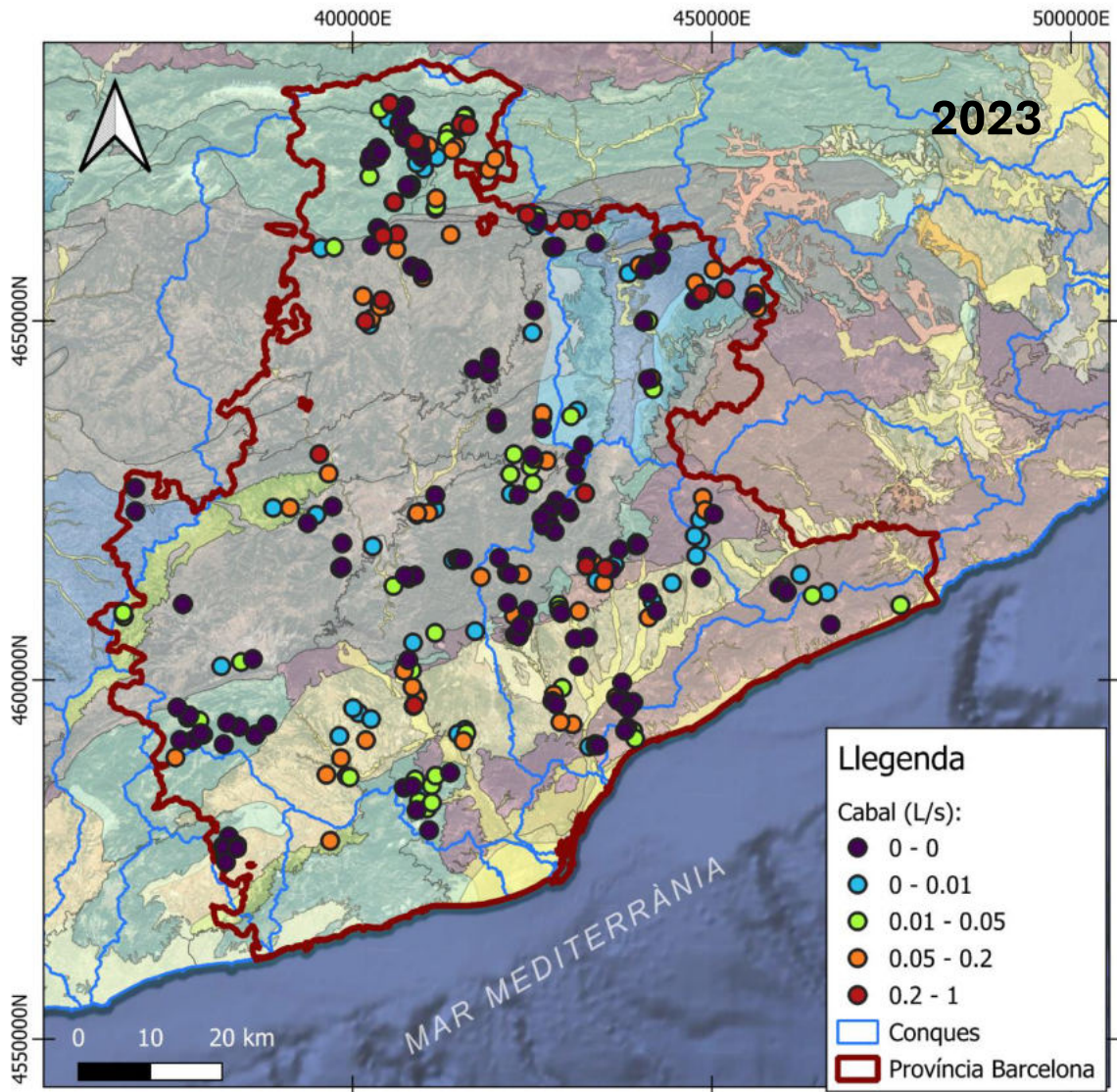


Figura I - 39: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2023.

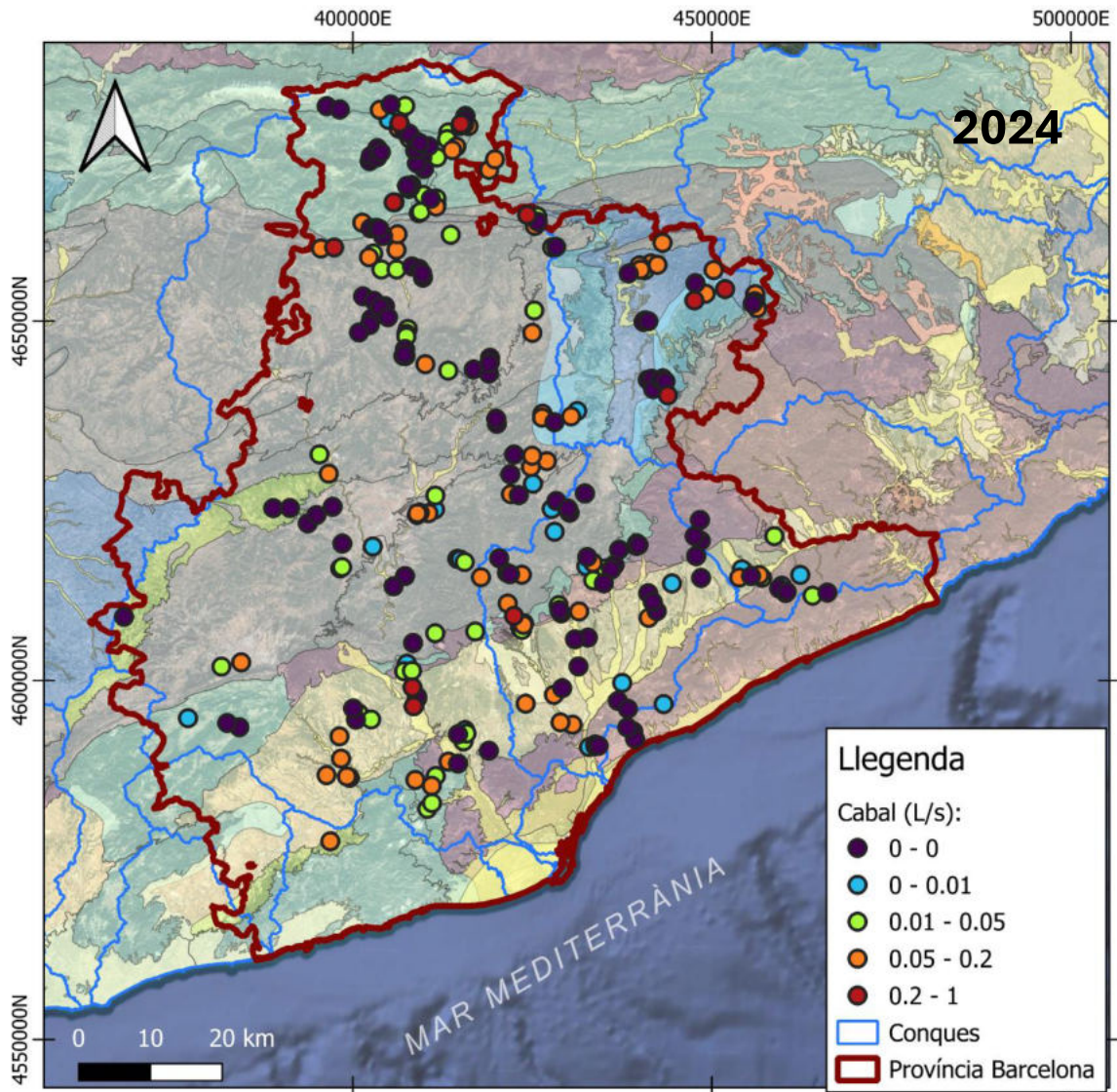


Figura I - 40: Distribució espacial del cabal (L/s) de les Fonts de la província de Barcelona estudiades 2024.



**Diputació
Barcelona**

**Àrea d'Acció Climàtica
i Transició Energètica**

Gerència de Serveis de Medi Ambient

*Comte d'Urgell, 187
Recinte de l'Escola Industrial
08036 Barcelona*

*www.diba.cat/mediambient
[@AccioClimaDiba](https://twitter.com/AccioClimaDiba)*