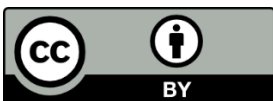


Estudi de les sèries hidromètriques de cabals diaris a Andorra

Equip de treball

Marta Domènech	Investigadora d'Andorra Recerca + Innovació
Gerard Grande	Investigador d'Andorra Recerca + Innovació
Oriol Travesset	Coordinador de l'eix Sostenibilitat d'Andorra Recerca + Innovació
Ramon J. Batalla	Col·laborador (Universitat de Lleida)
Damià Veritat	Col·laborador (Universitat de Lleida)



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement 4.0 Internacional](#)

Resum

Aquest estudi proporciona una anàlisi exhaustiva de les sèries hidromètriques de la conca del Valira a Andorra, abordant tant les incoherències detectades en les principals estacions de mesura com els patrons derivats del turbinat de la central hidroelèctrica d'Encamp. Els resultats obtinguts han permès desenvolupar dues sèries de referència robustes, consistents i representatives per a la conca de la Valira a Andorra. Aquestes sèries constitueixen una eina clau per a l'anàlisi hidrològica en contextos científics i de gestió.

Sumari

1.	Introducció	5
1.1	Antecedents.....	5
1.2	Objectius	6
2.	Sèries hidromètriques a Andorra.....	7
3.	Anàlisi de les estacions hidromètriques.....	9
3.1	Correcció de l'estació hidromètrica A022	10
3.2	Anàlisi de l'estació A402 respecte a l'estació A022.....	11
3.2.1	Incoherències de la sèrie A402 respecte a la sèrie A022.....	12
3.2.2	Anàlisi de regressió lineal.....	14
3.3	Anàlisi de l'estació A403 respecte a l'estació A022.....	16
3.3.1	Incoherències de la sèrie A403 respecte a la sèrie A022.....	17
3.3.2	Anàlisi de regressió lineal.....	19
4.	Sèries de referència.....	21
4.1	Correcció de les incoherències.....	21
4.2	Tractament del turbinat de FEDA	27
4.2.1	Anàlisi dels patrons setmanals associats al turbinat	27
4.2.2	Obtenció de la sèrie sense la influència del turbinat hidroelèctric.....	31
5.	Conclusions	32
	Referències.....	33

1. Introducció

Les conques d'Andorra, igual que la resta de conques dels Pirineus, s'enfronten a una sèrie de reptes motivats per l'augment de les temperatures i dels episodis climàtics extrems (períodes llargs de sequera i riuades de més magnitud). Alhora, el país té ja més de 85.000 habitants i una pressió turística marcada, esdevenint una de les àrees pirinenques amb més pressió antròpica. Aquest context fa que sigui imprescindible disposar de dades hidrològiques vàlides per estudiar i modelitzar els diferents escenaris hidrològics futurs, i per donar suport a les inversions destinades a l'adaptació al canvi climàtic, així com la possible regulació dels cabals ambientals en un context de transició energètica.

L'informe "Millora de les dades d'observacions de cabals de les conques fluvials d'Andorra" (AR+I, 2022) va posar de relleu la manca de dades hidromètriques de qualitat al país, així com la necessitat i potencialitats de millora.

Mentre duri aquest procés de millora de les dades disponibles, es considera important poder seguir treballant amb les sèries hidromètriques actuals amb la major garantia possible. Per aquest motiu es considera cabdal estudiar les sèries actuals i avaluar una possible correcció d'aquestes.

1.1 Antecedents

Un dels principals pilars per la recerca en matèria de recurs hídic i hidrologia és la disposició de dades de cabal. Rarament es disposa de dades de cabal directes. La variable que en la majoria d'estacions d'aforament es registra és la profunditat de l'aigua en una secció transversal estable i coneguda. La freqüència d'aquest registre determinarà la resolució temporal de les dades. Com més ràpida és la resposta d'una conca, major ha de ser la freqüència per assegurar un registre òptim i així poder obtenir les diferents oscil·lacions del cabal. Els valors de profunditat (calat) es transformen a cabal a partir de l'establiment de corbes de tarat en les que es relaciona la profunditat o calat (h) i el cabal (Q). Per establir aquestes corbes és fonamental disposar de dades de la geometria de la secció en la que es mesura la profunditat i la velocitat del flux. Aquestes dades es poden obtenir al camp amb equips de mesura hidromètrica directa, a partir d'equacions estàndards quan es disposa d'aforadors, o a partir de modelització hidràulica. Per aquest motiu, molt cops, disposar de dades de profunditat no garanteix tenir dades de cabal si no s'han establert, validat i revisat les corresponents corbes de tarat. En el marc del projecte Piragua, AR+I va estudiar les dades de cabals disponibles a Andorra per a poder utilitzar-les en la modelització realitzada (Beguiria et al., 2019). En aquesta recerca, es van detectar fortes incongruències en les sèries de dades de les estacions d'aforament d'Andorra i una mancança en la disponibilitat de dades

acurades sobre cabals baixos, necessàries per a l'estudi de períodes de sequera, i dels cabals ambientals i generadors del riu.

Seguint aquesta línia enfocada a millorar les sèries hidromètriques del país, aquest document analitza les sèries hidromètriques amb els registres històrics més llargs disponibles a Andorra. Aquestes dades provenen de les estacions de titularitat de la *Confederación Hidrográfica del Ebro* (CHE) ubicades al Pont dels Escalls (A402) i a la borda del Sabater (A403), i es comparen amb la sèrie hidromètrica de la Valira a la Seu d'Urgell (A022), també de titularitat de la CHE¹.

1.2 Objectius

L'objectiu principal d'aquest estudi és el d'analitzar les sèries de dades de cabals disponibles a la conca andorrana, identificar-ne la més adequada per a la realització d'estudis hidrològics i analitzar la possibilitat de corregir-la a fi de disposar d'una sèrie de cabals de referència.

Els objectius específics del present informe es detallen a continuació.

1. Identificar les estacions hidromètriques disponibles a la conca andorrana amb potencialitat per ser utilitzades en estudis hidrològics i ambientals.
2. Analitzar les sèries de cabals de les estacions hidromètriques escollides prenent com a referència la sèrie de cabals del Valira a la Seu d'Urgell (A022), mantinguda i validada per la CHE.
3. Elaborar una sèrie de referència a partir de la sèrie de cabals de les estacions analitzades més consistent i robusta respecte a l'A022.

¹ Més informació a <http://www.saihebro.com>

2. Sèries hidromètriques a Andorra

Actualment es disposa de diverses estacions, algunes d'elles pròpiament d'aforament i d'altres que són marcs de control per a la gestió d'emergències (riuades), en les que es registren dades relacionades amb el cabal. Tot seguit, a la Taula 1 es detallen les estacions actuals amb la informació disponible associada.

Estació	Codi	Propietat	Variables	Data inici	Sensor	Llera fixa*	> 10 anys	Fq.
SAIH Valira Borda Sabaté ²	A403	CHE	Calat, cabal	20/05/2009	Radar	Si	Si	5 min
SAIH Valira del Nord ²	A402	CHE	Calat, cabal	01/10/2002	Boia	Si	Si	5 min
SAIH Valira d'Orient ²	A401	CHE	Calat	01/01/1998	Boia	Si	Si	5 min
Borda Sabaté Govern		Govern	Calat, cabal	No es coneix	Radar	Si		5 min
Riu Madriu (Pont Pla)		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Riu de Pal (Pont dels Agrels)		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Riu d'Arinsal		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	Si	No	10 min
Pont del Tarter		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Pont de les mines		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Pont d'Òs de Civís		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Pont de la Bartra		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Pont de l'aiguerola (Rigoder)		Protecció Civil	Calat, cabal	01/01/2019	Radar	No	No	10 min
Prada Casadet		PEUSA	Calat, cabal	01/11/2019	Radar	Si	No	10 min
SAIH Valira ² Seu d'Urgell	A022	CHE	Calat, cabal	27/02/1997	Radar	Si	Si	10 min

*Taula 1. Estacions de mesura de calat i/o cabal a la conca del Valira (*Llera fixa fa referència a secció artificial assimilable a una estació d'aforament), on s'especifiquen les característiques de cada estació. Fq. = Freqüència en la recollida de dades*

La Figura 1 presenta la ubicació de les estacions hidromètriques disponibles a la conca d'interès. La majoria són estacions propietat de Protecció Civil amb registres de dades curts, que tenen com a finalitat la detecció de calats alts per a la gestió d'emergències en situació de riuades. La major part d'aquestes estacions són de llera mòbil i presenten dificultats en l'estimació dels cabals baixos. No obstant n'hi ha d'altres com les de la CHE, la de PEUSA³ i la del Govern d'Andorra, que tenen l'objectiu de mesurar calats , i per tant cabals, de manera contínua en tot el seu rang.

Com es pot observar en la Taula 1, l'estació més antiga és la de la Valira a la Seu d'Urgell (A022), titularitat de la CHE i publicada al *Servicio Automático de Información*

² <http://www.saihebro.com/>

³ Més informació a www.peusa.org

Hidrològica (SAIH). La següent amb més registres històrics és la del Valira d'Orient (A401) també publicada al SAIH, on només es mesura el calat i on no es calcula el cabal.

Les estacions de la CHE tenen l'avantatge que normalment estan calibrades i mantingudes per aquest organisme de conca, que té llarga experiència en el manteniment i tractament d'aquest tipus de dades i estacions. No obstant, des de l'any 2016 la CHE va deixar de fer el seguiment i el calibratge de les estacions A401, A402 i A403, no així a l'estació de la Seu d'Urgell (A022)⁴ que continua mantenint. Una fortalesa addicional de les estacions de la CHE és que les seves dades són d'accés obert a través del SAIH, fet imprescindible per fer recerca i per garantir-ne la transparència i traçabilitat.



Figura 1. Ubicació de les estacions hidromètriques de mesura de calat i/o cabal a la conca de la Valira

⁴ Comunicació personal de la CHE, *Àrea de Hidrologia y Cauces*

3. Anàlisi de les estacions hidromètriques

Per utilitzar les sèries de cabal de les estacions hidromètriques en estudis hidrològics cal que aquestes siguin mínimament llargues (i. e. com a mínim 10 anys, preferentment 30), a més de consistents (completes) i fiables (manteniment i validació regular de la corba h/Q).

La fiabilitat dels cabals és normalment major si aquests es deriven d'estacions hidromètriques de llera fixa on les condicions hidràuliques són estables. En aquest sentit, set de les estacions de la conca andorrana disposen de llera fixa, però només tres disposen de dades de cabal amb sèries de més de 10 anys (SAIH Valira Borda Sabaté-A403, SAIH Valira del Nord-A402 i SAIH Valira Seu d'Urgell-A022).

Les estacions A403 i A402 no estan sotmeses a un mínim manteniment. La darrera visita a les estacions va ser a l'any 2016⁴ i, per tant, no es troben incloses en la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA)⁵. En canvi l'estació A022 (SAIH Valira Seu d'Urgell) té un seguiment continu per part de la CHE. Per aquest motiu es considera l'A022 com l'estació de referència en el present informe.

Cal tenir en compte que els registres de cabal de l'estació A022 no integren els cabals que es deriven per rec en la captació que es troba entre l'estació A022 i l'A403 (vegeu Figura 1). Aquesta derivació d'aigua de reg s'emmarca dins d'una concessió històrica a la Comunitat de Regants del Rec dels Quatre Pobles, que acaba alimentant la central hidroelèctrica d'Adrall. El cabal màxim de captació és de 2,25 m³/s. Aquesta aigua proporciona reg a unes 90 ha de conreus i prats de la Seu d'Urgell. L'aigua que es capta entre les dues estacions (A403 i A022) té el retorn aigües avall de l'estació A022 i, per tant, és un volum d'aigua que no es comptabilitza a l'estació A022. Això suposa un problema en la comparació de les diferents estacions en territori andorrà respecte a la de la Seu d'Urgell.

La metodologia plantejada en el present informe s'inicia amb la restitució del cabal captat per reg a l'estació A022 (veure secció 3.1). A continuació, s'analitza la sèrie de cabals de les estacions A402 (veure secció 3.2) i A403 (veure secció 3.3) respecte a la sèrie de l'estació considerada com a referència, l'A022, per tal d'avaluar la consistència i robustesa de dites sèries. Finalment, en la secció 4, s'elabora la sèrie de cabals de referència a Andorra a partir de la sèrie analitzada més consistent respecte a la sèrie A022.

⁵ <https://www.chebro.es/en-GB/roea>

3.1 Correcció de l'estació hidromètrica A022

Com s'ha esmentat prèviament, l'estació A022 té aigües amunt la captació del canal de rec dels Quatre Pobles amb un cabal concessionat de fins a 2,25 m³/s, sempre respectant el cabal ambiental en aquest tram de riu. No obstant, no es coneix amb exactitud el cabal diari extret en aquest punt de captació. Per tant, per aconseguir els valors aproximats mitjans que es deriven d'aquesta captació cal estimar el cabal diari captat per poder-lo afegir al cabal diari mesurat a l'estació A022, i així fer més acurada la comparació entre l'estació A403 i A022.

Al punt de captació hi ha establert un cabal ambiental definit per la CHE de 0,4 m³/s⁶. En principi, quan el cabal és alt es pot derivar tot el cabal concessionat (i. e. 2,25 m³/s), respectant el cabal ambiental al punt de la captació. Això significa que si en el punt de la captació es sobrepassen els 2,65 m³/s, que són els 2,25 m³/s de la concessió més els 0,4 m³/s, es deriva el cabal concessionat (i. e. 2,25 m³/s), i per tant caldria sumar aquest cabal a l'estació A022. En cas que el cabal no sigui tant alt, es derivarà la quantitat de cabal que es pugui, respectant el cabal ambiental per arribar, com a molt, a la quantitat màxima de 2,25 m³/s. I quan el cabal no superi els 0,4 m³/s, no es pot derivar cap cabal al canal de rec dels Quatre Pobles.

En la Figura 2 es presenten les dues sèries de cabal mig diari de l'estació A022, la sèrie original que es pot descarregar del ROEA⁵, i la sèrie corregida afegint l'estimació del cabal mig diari que es derivaria al canal de rec dels Quatre Pobles.

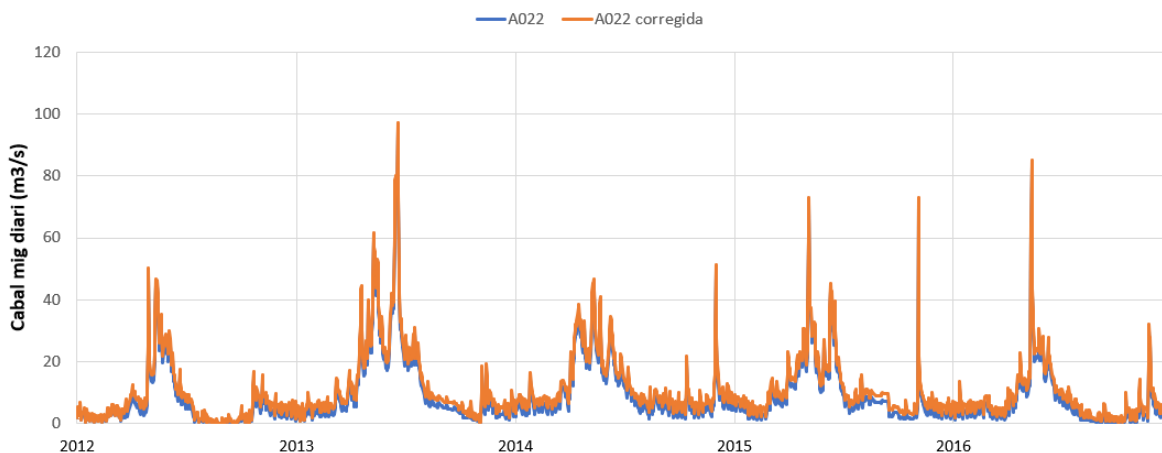


Figura 2. Sèries de cabal mig diari (m³/s) de l'estació A022 abans i després de la correcció per afegir el canal de Rec dels Quatre Pobles (només es mostra el període 2012-2016)⁷

Tal i com es pot observar en el gràfic interactiu, en general s'incrementen els cabals mínims. Per tot plegat, integrant la correcció, l'increment percentual del volum total

⁶ Comunicació personal PEUSA

⁷ Accés al gràfic interactiu

https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A022_A022_corregida.html

de cabal acumulat a la sèrie de cabals de l'estació A022, és del 24,2%. A partir d'aquesta secció, quan es fa referència a la sèrie A022, es fa referència a la sèrie corregida de l'A022.

3.2 Anàlisi de l'estació A402 respecte a l'estació A022

La Figura 3 presenta la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació SAIH Valira del Nord-A402 situada al Pont dels Escalls (veure Figura 1), respecte a la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació A022 pel període de coincidència (2003-2023).

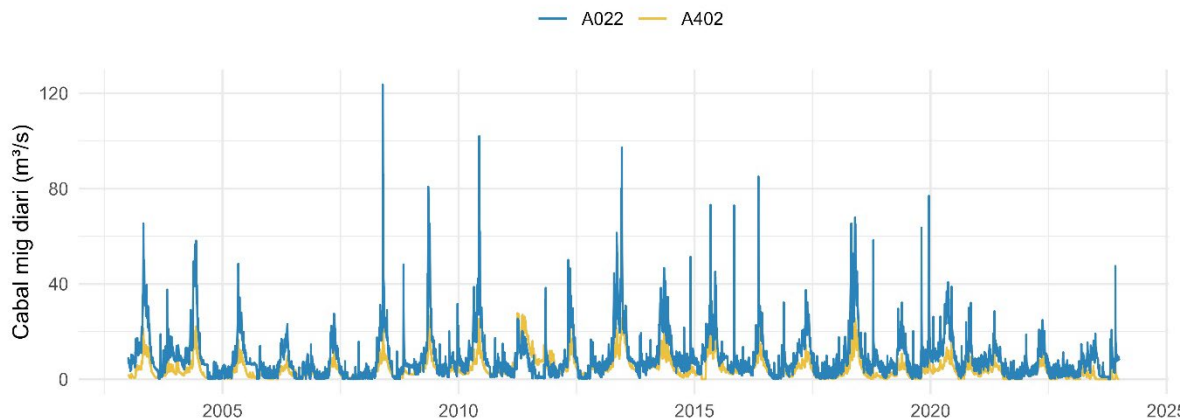


Figura 3. Evolució de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 (2003-2023)⁸

Analitzant les sèries històriques de cabals de les dues estacions, es detecta un patró estacional en comú en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel principalment i precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). No obstant, el cabal de l'estació A022 presenta unes oscil·lacions setmanals que no presenta l'estació A402 (veure Figura 4). Això és degut a que l'estació A402, que representa la conca del Valira del Nord (veure Figura 1), no té el règim alterat per la captació i turbinat de l'estació hidroelèctrica d'Encamp, situada al Valira d'Orient. Per contra, el cabal de l'estació A022 sí que presenta les oscil·lacions ja que recull l'aigua també del Valira d'Orient. Aquestes oscil·lacions s'estudien amb major detall en la secció 4.2.

A més a més, la magnitud dels cabals associats a l'estació A022, que es troba aigües avall de l'estació A402, hauria de ser superior a la magnitud dels cabals d'aquesta última. No obstant, durant certs períodes, per exemple el període 2011-2013 que es presenta a la Figura 4, aquesta premissa no es va complir. A continuació s'analitzen amb detall aquestes incoherències.

⁸ Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A402_A022.html

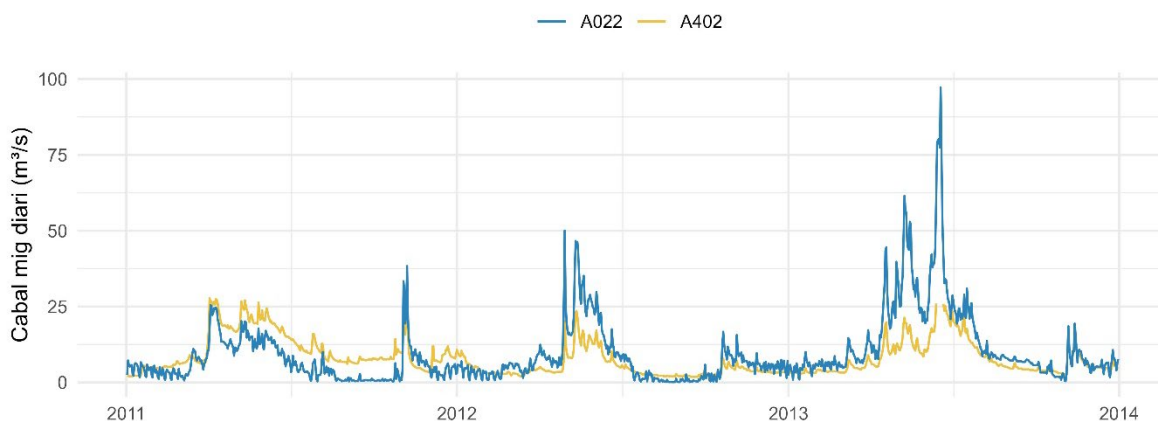


Figura 4. Detall del gràfic de la figura 3 en l'interval temporal (2011-2013) de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022

3.2.1 Incoherències de la sèrie A402 respecte a la sèrie A022

En aquest apartat, es defineix una incoherència quan el cabal de la sèrie A402 supera el cabal corresponent de la sèrie A022 (és a dir, quan $A022 - A402 < 0$). S'han analitzat exclusivament els cabals incoherents d'ambdues sèries i s'ha calculat el percentatge d'incoherències respecte al nombre total de cabals anuals (Figura 5a).

El percentatge d'incoherències durant el període 2003-2023 mostra una variabilitat considerable. Mentre que el primer any presenta un nivell mínim d'incoherències (al voltant del 2%), aquest s'incrementa progressivament fins a assolir el 40% l'any 2007. Entre el 2008 i el 2010, el percentatge es modera i es situa al voltant del 10%. No obstant, l'any 2011 dit percentatge experimenta una pujada abrupta fins al 80%. Aquest any es considera atípic, ja que pràcticament la totalitat dels cabals són incoherents, una anomalia respecte a la resta d'anys, en què el percentatge d'incoherències es manté per sota del 40%. És possible que entre els dies 16 i 17 de gener de 2011 es produís un ajustament en la corba de tarat ja que a partir d'aquest moment i fins a finals d'any els cabals estimats mostren un biaix constant, superant de forma sistemàtica els cabals de la sèrie A022 (veure Figura 6). A partir del 2012 el percentatge d'incoherències es torna a reduir progressivament, mantenint-se per sota del 10% des del 2014 fins a finals del període analitzat, amb l'excepció puntual de l'any 2016.

A continuació s'ha examinat la distribució dels cabals incoherents de l'A402 per cada any (veure Figura 5b). A excepció de l'any 2006 i del període 2011-2015, les incoherències tendeixen a concentrar-se en cabals inferiors o propers als $2,5 m^3/s$.

Finalment, s'ha analitzat la variació absoluta dels cabals de l'A402 associats a incoherències respecte als cabals corresponents de l'A022 (veure Figura 5c). Durant

els períodes en que els cabals de l'A402 associats a les incoherències es mantenen per sota de 2,5 m³/s, la variació pràcticament mai supera 1 m³/s.

En conjunt, durant tot el període 2003-2023, excepte pels anys 2006-2008 i 2011-2013, la sèrie A402 presenta una incidència baixa de cabals incoherents, concentrant-se principalment en cabals baixos i amb desviacions inferiors o properes a 0,5 m³/s respecte als cabals de la sèrie A022.

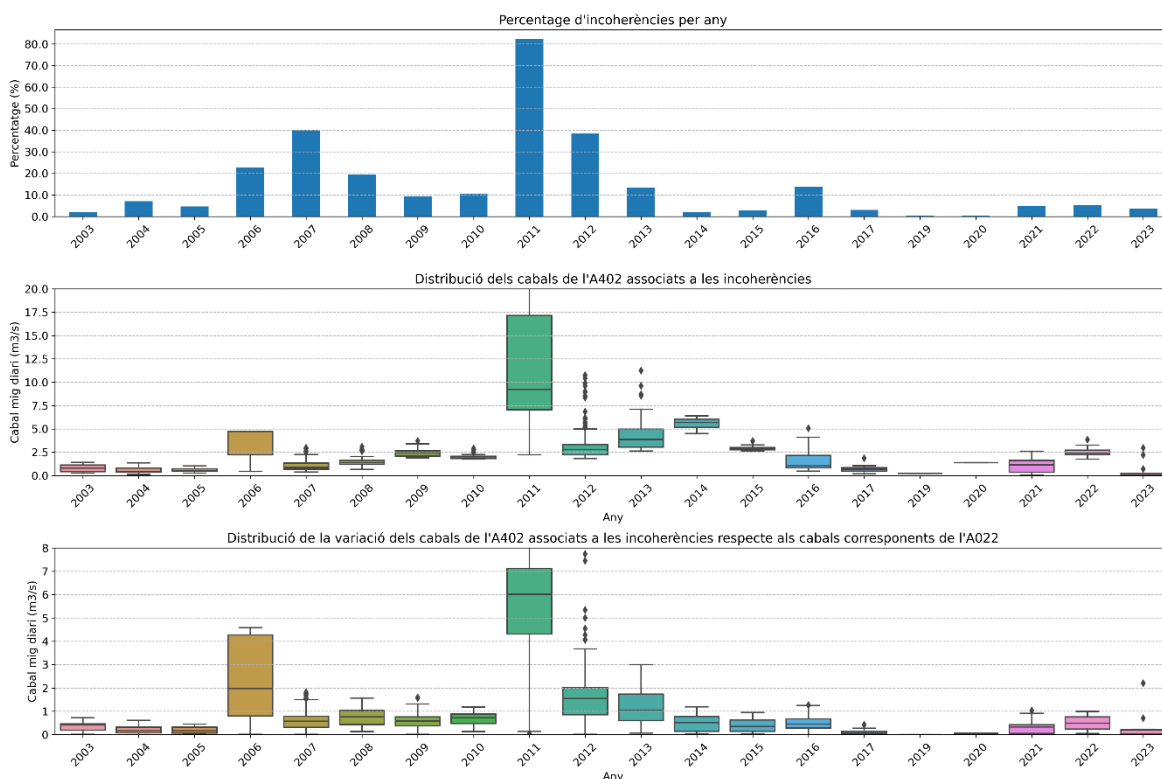


Figura 5. a) Percentatge corresponent al nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A402 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022, respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A402 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A402 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A402 associats a les incoherències respecte als cabals corresponents de l'A022

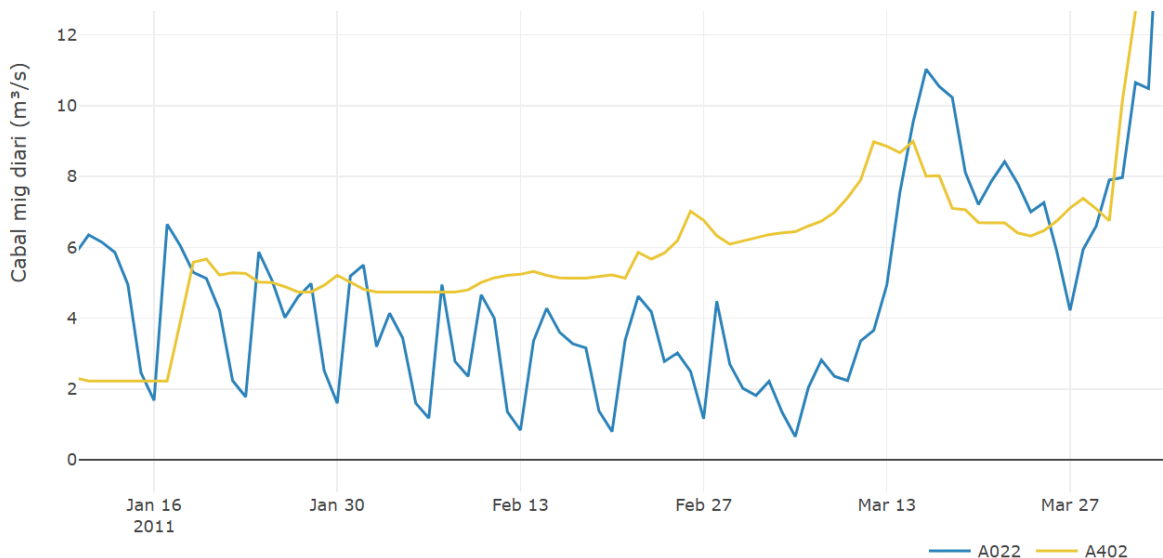


Figura 6. Exemple de sèrie de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 (primers mesos del 2011)

3.2.2 Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les incoherències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A402 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (veure Figura 7).

$$\text{Cabdal mig diari}_{A402} = \beta * \text{Cabdal mig diari}_{A022} + \alpha$$

En dita modelització no es consideren els cabals associats a les incoherències ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. El model explica el 83% de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A402. Malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats⁹ no segueixen una distribució normal. Tampoc presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Això significa que el model no aconsegueix capturar correctament tots els patrons subjacents de les dades.

No obstant, la variància dels residuals augmenta de manera molt accentuada per cabals baixos i.e. inferiors a la mediana de la sèrie A022 fins a $6,5 m^3/s$ aproximadament (mediana de la sèrie A022 en el període 2003-2023). Per cabals de la sèrie A022 superiors a $6,5 m^3/s$, i.e. superiors a la mediana, els residuals presenten una distribució normal (p-valor $>5\%$ per el test Kolgomorov-Smirnov) i una distribució homocedàstica (p-valor $>5\%$ per el test Breusch-Pagan) respecte als valors de l'eix horitzontal (a partir de $18 m^3/s$).

⁹ Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard de dits residuals

Així doncs, el model no aconsegueix capturar els patrons subjacents de les dades per el rang de cabals baixos de la sèrie A022 però sembla adequar-se millor per cabals alts (> 6,5 m³/s).

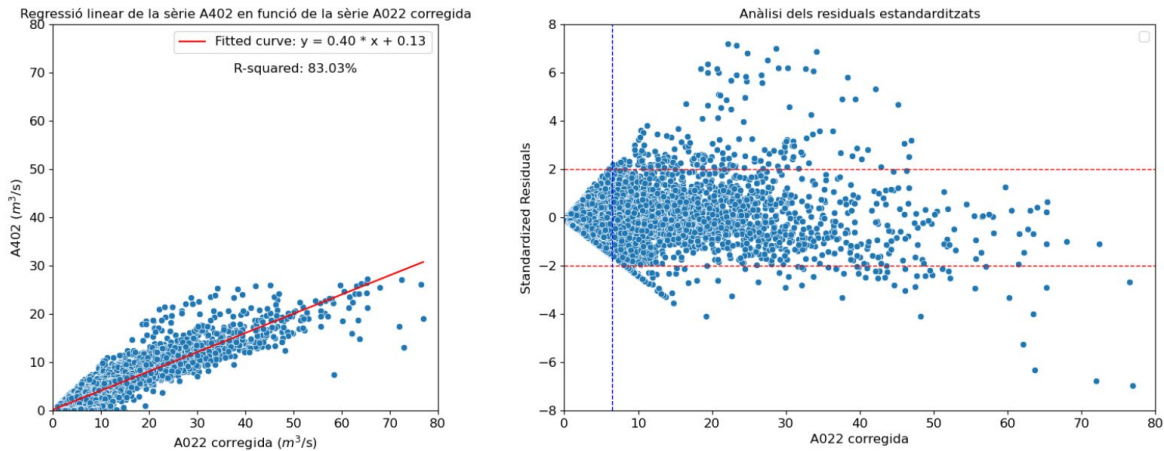


Figura 7. Dispersió de les sèries de cabal mig diari (m³/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 (a l'esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A402 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2003-2023) (A la dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2003-2023 (6,5 m³/s)

Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A402 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors a 6,5 m³/s) i cabals alts (superiors a 6,5 m³/s)—, es poden identificar clarament diferents règims hidrològics (veure Figura 8). En el rang de cabals baixos, la correlació lineal (r^2) entre ambdues sèries és baixa (30%), cosa que dificulta l'aplicació d'una regressió lineal en aquest interval, amb un error mitjà elevat del 80%. En canvi, en el rang de cabals alts, la correlació lineal és molt significativa (al voltant del 80%), fet que indica que la regressió lineal és més adequada en aquest interval, amb un error mitjà reduït al 47%.

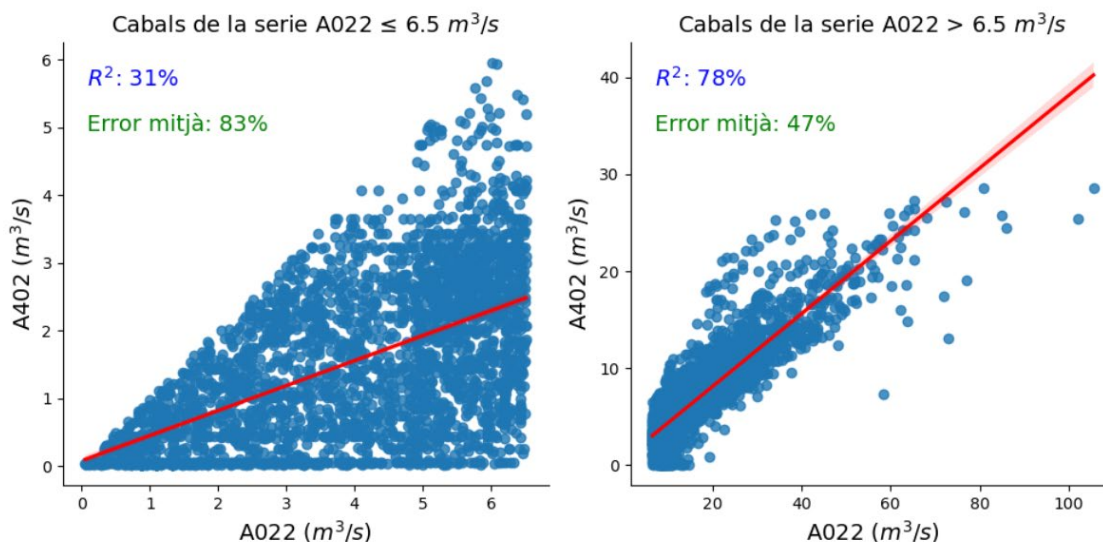


Figura 8. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 per cabals baixos ($<6,5 \text{ m}^3/\text{s}$) (esquerra) i alts ($>6,5 \text{ m}^3/\text{s}$) (dreta)

A continuació, es realitza el mateix anàlisi per l'estació A403 per tal de veure si la sèrie de cabals es pot modelitzar en funció de la sèrie A022 d'una manera més robusta sobretot per cabals baixos.

3.3 Anàlisi de l'estació A403 respecte a l'estació A022

En aquesta secció s'analitza la sèrie de l'estació de la conca del riu Valira situada a Borda Sabaté (A403) respecte a l'estació de referència A022. La Figura 9 mostra els cabals diaris pel període temporal màxim on existeixen dades per ambdues estacions (2009-2023). L'estació A403 és l'estació andorrana més propera a l'estació A022 i ambdues estan afectades per l'activitat de la central hidroelèctrica de FEDA ja que recullen aigua de la conca de la Valira d'Orient. Tal i com es pot observar en la Figura 9, l'evolució de les sèries temporals dels cabals de les estacions A022 i A403 presenten els mateixos patrons periòdics al llarg de cada any:

- Patró setmanal en el qual els cabals de les dues estacions, que es troben aigües avall del desguàs de la central hidroelèctrica d'Encamp, segueixen una evolució que reflecteix el model d'explotació del Llac d'Engolasters per part de FEDA durant la major part de setmanes del període estudiat.
- Patró estacional en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel principalment i precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). Aquest patró també s'observa a la sèrie de cabals de l'estació A402 estudiada prèviament.

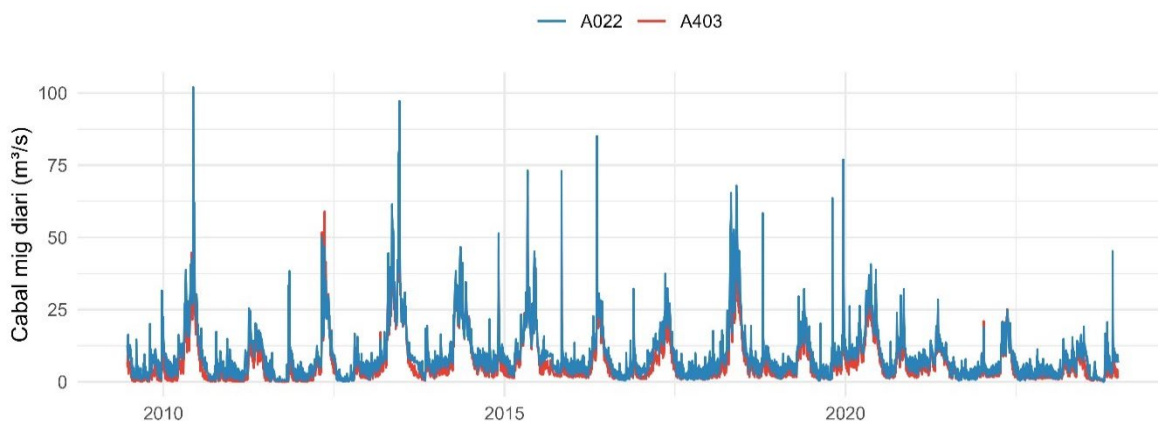


Figura 9. Evolució de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A403 i A022 (després de la correcció per afegir el canal de Rec dels Quatre Pobles) (2009-2023)¹⁰

No obstant, la sèrie de cabals de l'estació A403, igual que la sèrie de cabals de l'estació A402, presenta incoherències significatives, amb períodes en què els cabals mitjans diaris de dita estació superen els de l'estació A022, situada aigües avall. A continuació, s'analitzen en detall aquestes incoherències.

3.3.1 Incoherències de la sèrie A403 respecte a la sèrie A022

De la mateixa manera que per l'anàlisi de la sèrie A402, en aquest apartat es defineix una incoherència quan un cabal de la sèrie A403 presenta un valor superior al cabal corresponent de la sèrie A022 (és a dir, quan $A022 - A403 < 0$). Analitzant exclusivament els cabals incoherents d'ambdues sèries, s'ha calculat el percentatge d'incoherències respecte al nombre total de cabals anuals (Figura 10a).

De la mateixa manera que per a la sèrie A402, el percentatge d'incoherències associades a la sèrie A403 és altament variable i segueix un patró semblant però, en aquest cas, no supera el 20% durant tot el període estudiat 2009-2023. De fet, mentre que el primer any presenta un nivell mínim d'incoherències (menys del 2%), aquest augmenta de manera sostinguda fins a assolir el 17,5% el 2016.

Dit percentatge cau fins el 2,5% l'any 2020 i repunta al 20% l'any següent. És rellevant observar que el percentatge d'incoherències es manté per sobre del 10% durant els anys 2012, 2016-2017 i 2021-2023, coincidint amb els anys més secs del període segons l'índex de precipitació estàndard¹¹ (SPI, segons les seves sigles en anglès). No obstant, es requeriria una anàlisi més profunda per tal d'esbrinar si hi ha una relació de causalitat significativa entre els anys humits i el nombre d'incoherències registrades.

¹⁰ Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A403_A022.html

¹¹ Detall a <https://www.mediambient.ad/butlleti-de-seguiment-del-recurs-hidric>

Posteriorment, s'ha examinat la distribució dels cabals incoherents de l'A403 per any (Figura 10b). Exceptuant l'any 2022 i el període 2010-2015, les incoherències tendeixen a concentrar-se en cabals inferiors a 1 m³/s i pràcticament mai superen els 2 m³/s (veure Figura 11). Tenint en compte que la dispersió dels cabals és reduïda, la hipòtesi que s'ha mencionat en el cas de l'estació A402 també es plausible en aquest cas: la saturació de la corba de tarat de l'estació A403 en condicions de baixa profunditat. No obstant, en aquest cas, el cabal mínim mesurable de l'estació d'aforament seria més baix que per l'estació A402, indicant millor precisió i/o sensibilitat a l'hora de mesurar els cabals baixos. Tanmateix, quan s'analitza la variació (en termes absoluts) dels cabals de l'A403 associats a incoherències respecte als cabals corresponents de l'A022 (veure Figura 10c), es pot apreciar com dites variacions no superen mai els 1 m³/s excepte l'any 2010, indicant una major consistència durant els anys.

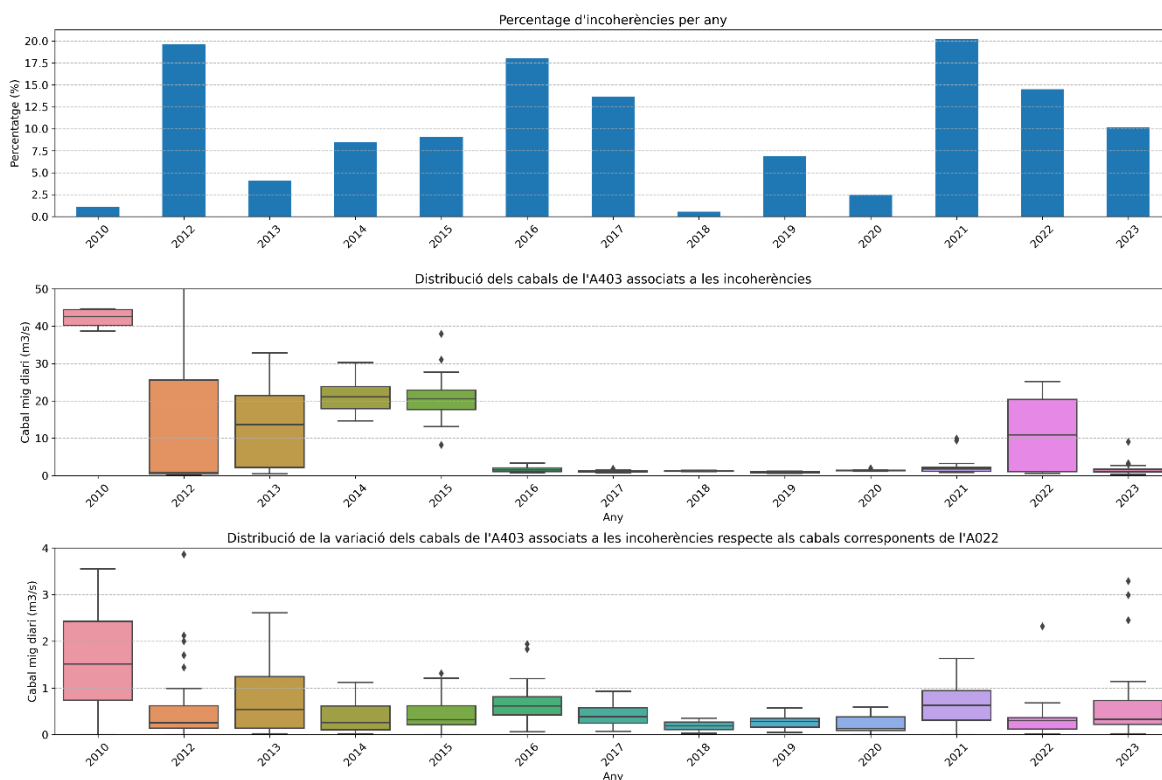


Figura 10. a) Percentatge corresponent al nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022, respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les incoherències respecte als cabals corresponents de l'A022

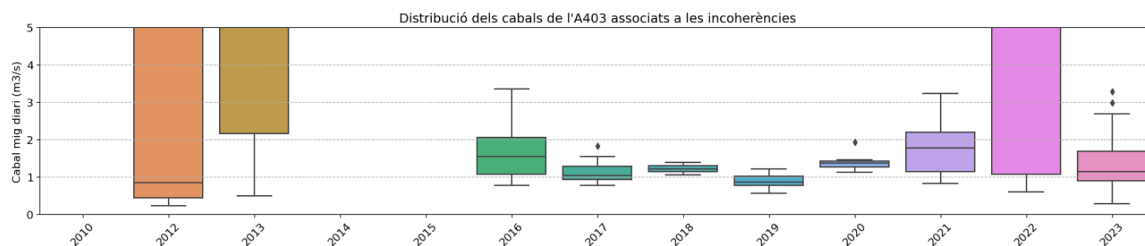


Figura 11. Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$) per un rang inferior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3.2 Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les incoherències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A403 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (Figura 12):

$$\text{Cabal mig diari}_{A403} = \beta * \text{Cabal mig diari}_{A022} + \alpha$$

En aquesta modelització tampoc es consideren els cabals associats a les incoherències ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. En aquest cas, el model explica el 96% ($r^2 = 0,96$) de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A403. No obstant, malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats¹² tampoc segueixen una distribució normal ni presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Globalment, el model tampoc captura correctament tots els patrons subjacents de les dades.

La variància dels residuals augmenta de manera pronunciada en el rang de cabals baixos de la sèrie A022, fins a aproximadament $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$, que correspon a la mediana de la sèrie per al període 2010-2023 (veure Figura 12). Tanmateix, a diferència del comportament observat en el cas de la sèrie A402, el model aplicat a la sèrie A403 subestima els cabals quan els valors de l'A022 són propers a $0 \text{ m}^3/\text{s}$ (generant residuals positius) i els sobreestima quan els valors de l'A022 s'acosten a $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (generant residuals negatius). Aquest patró indica que el model mostra un biaix sistemàtic en aquest rang de cabals. A partir de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, el biaix ja no es tan aparent. La mitjana dels residuals tendeix cap a 0 i a partir de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ fins a $60 \text{ m}^3/\text{s}$, els residuals presenten una distribució pràcticament homocedàstica (p -valor $> 5\%$ per el test Breusch-Pagan).

Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A403 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors a $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$) i cabals alts (superiors a $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$)—, es poden identificar també diferents comportaments hidrològics (Figura 13). Per cabals baixos, s'observa una correlació lineal significativa

¹² Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard de dits residuals

(57%) entre ambdues sèries i un error mitjà (66%) inferior a l'error obtingut en el cas de la sèrie A402 (83%). Aquest anàlisi suggereix que el biaix identificat es deu a la influència dels cabals superiors a 6,8 m³/s en el model general. Per cabals alts, els resultats també són millors que en el cas de la sèrie A402.

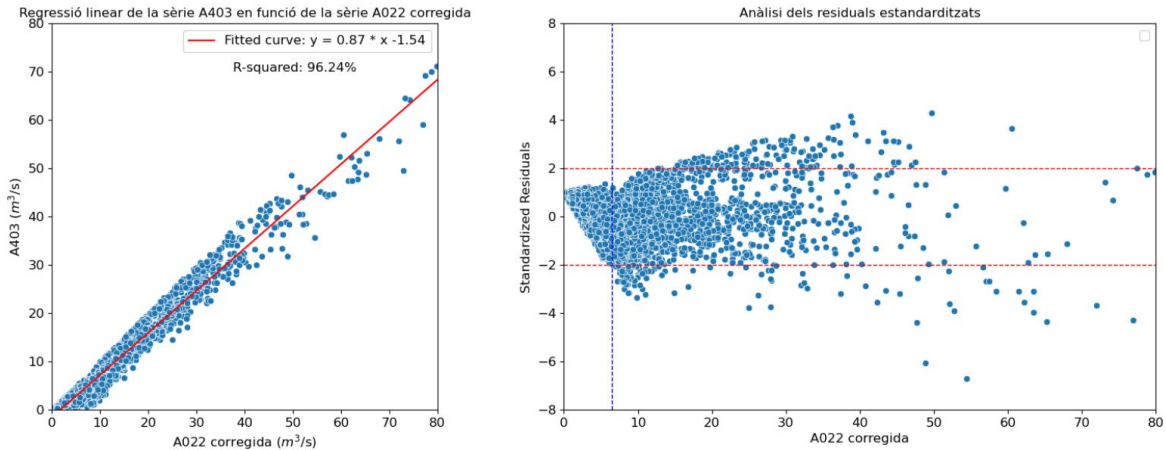


Figura 12. Gràfic de dispersió de les sèries de cabal mig diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A403 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2009-2023) (dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2009-2023 (6,8 m³/s)

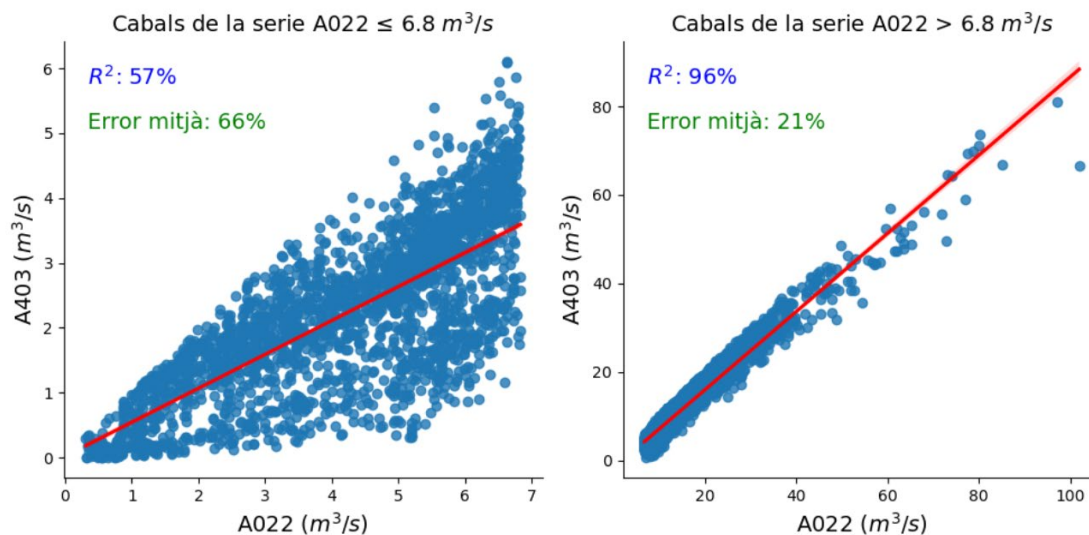


Figura 13. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mig diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 per cabals baixos (esquerra) i alts (dreta)

4. Sèries de referència

Un cop analitzades les sèries hidromètriques de les estacions andorranes A402 i A403 respecte a la sèrie de referència de la Seu d'Urgell A022, en aquesta secció es procedeix a l'elaboració de les sèries hidromètriques que serviran de referència a Andorra.

Aquestes sèries de referència s'han elaborat a partir de la sèrie A403 ja que:

- Hi ha un 9% d'incoherències a la sèrie A403 (2009-2023), mentre que a la sèrie A402 n'hi ha un 14% si es considera el període complet 2003-2023 i 13% si es considera només el període 2009-2023.
- El percentatge d'incoherències de la sèrie A403 no supera en cap any del període el 20% mentre que sí ho fa la sèrie A402, per exemple l'any 2011 amb 80% d'incoherències.
- La distribució dels cabals de la sèrie A403 associats a les incoherències és menys variable d'any a any (durant el període 2015-2023 sobretot) que en el cas de la sèrie A402.
- La relació lineal és més robusta entre la sèrie A403 i la sèrie A022 tant per cabals baixos com per cabals alts.

A continuació s'han corregit les incoherències detectades en la sèrie A403 per així obtenir la primera de les sèries de referència. Tenint en compte que els cabals de les estacions A403 i A022 estan influenciats per la central hidroelèctrica d'Encamp, s'ha implementat en la secció 4.2 un tractament relatiu als turbinats de FEDA per tal d'obtenir, addicionalment, una sèrie de referència sense la influència de la hidroelèctrica. Ambdues sèries de referència poden descarregar-se des de la web d'Andorra Recerca + Innovació¹³. L'elecció d'una o altra sèrie en estudis hidrològics dependrà de la ubicació de cada cas d'estudi.

4.1 Correcció de les incoherències

Tal i com s'ha mostrat en la secció 3, en funció del rang de cabals de l'estació A022, la relació lineal entre els cabals de l'A403 i l'A022 varia significativament i s'identifiquen dos règims hidrològics diferents, per cabals baixos i per cabals alts. Per tal d'ajustar el model amb major precisió per a cada rang específic, s'han modelitzat per separat els cabals baixos i els cabals alts a través d'una regressió segmentada (*piecewise regression*) dels cabals de l'A403 en funció dels cabals de l'A022. Aquesta tècnica permet ajustar diferents models lineals a diferents intervals d'un conjunt de dades. És

¹³ Sèries disponibles a https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

especialment útil quan la relació entre les variables no és uniforme en tot l'interval de dades, sinó que presenta "canvis de tendència" o "punts de trencament" (*breakpoints*) a partir dels quals la relació entre les variable canvia.

Per dur a terme aquesta regressió segmentada, es modelitza la sèrie de cabals de l'estació A403 a partir del model següent (Pilgrim, 2021):

$$y = \alpha x + c + \beta(x - \psi)H(x - \psi) + \zeta$$

on:

y: Cabal estimat de l'A403 a partir del model.

x: Cabal observat de l'A022 corregit.

α : Coeficient de regressió del primer segment (corresponent als valors de l'A022 compresos entre 0,8 m³/s i el *breakpoint*, sense incloure aquest darrer).

c: Constant d'intersecció amb l'eix y del primer segment.

β : Diferència entre el coeficient de regressió del primer segment i el segon (**$\alpha 2 - \alpha 1$**) (és a dir, el canvi de pendent entre els dos segments).

ψ : Cabal de l'A403 que defineix el *breakpoint*.

H(x - ψ): Funció de Heaviside (*Heaviside step function*), que pren el valor 1 si x és superior o igual a ψ , i 0 si x és inferior a ψ .

ζ : Error associat a x, que segueix una distribució normal N(0,1)

Aquest enfocament permet modelitzar la transició entre diferents règims de cabals amb precisió, capturant tant la variació en la tendència com en la dispersió.

Tenint en compte que el nombre d'incoherències i el rang de cabals de la sèrie A403 associat a les incoherències varia en funció dels anys (sobretot durant els primers anys de període), es decideix realitzar dita modelització per cada any de forma independent. S'exposen tots els resultats al fitxer "regression_analysis_A403.pdf".

A continuació, es presenten els resultats de la regressió segmentada (considerant tots els cabals en un mateix model) per dos anys en concret: un any humit, el 2020, marcat per unes precipitacions notablement superiors a la mitjana, amb un hivern plujós segons l'SPI¹⁴, i un any sec, el 2022, que es va registrar com un dels més càlids a l'estació Central de FEDA des de 1950, amb precipitacions per sota de les del període de referència¹⁵.

¹⁴ Detall a <https://www.mediambient.ad/butlleti-de-seguiment-del-recurs-hidric>

¹⁵ Més informació a <https://ari.ad/noticies/tanquem-2022-calid-lestacio-central-fed>

En el cas de l'any humit, tal i com s'ha mencionat anteriorment, tot i que la correlació lineal entre la sèrie A403 i A022 és significativa per cabals baixos, el model de la regressió lineal està esbiaixat per dits cabals (veure Figura 14). En canvi, aplicant la modelització presentada en aquesta secció, aquest biaix no apareix i els residuals presenten una distribució normal i una distribució pràcticament homocedàstica tant pels cabals baixos com pels alts (veure Figura 15).

En el cas de l'any sec, es pot dir el mateix que s'ha mencionat en el paràgraf anterior (veure Figura 16 i Figura 17), amb la diferència que la distribució dels residuals presenta una certa heterocedasticitat.

Globalment, es pot afirmar que la regressió segmentada ofereix resultats més robustos que la regressió lineal i que, per tant, és més òptima per tal de corregir les incoherències de la sèrie de referència.

La correcció de les incoherències es realitza amb l'estimació dels cabals de la sèrie A403 a partir dels cabals de la sèrie A022 (que estan associats a les incoherències) mitjançant el model de regressió segmentada per any. Un cop fetes les correccions, la proporció d'incoherències totals durant el període 2009-2023 baixa del 9% al 5%, dels quals el 4,1% corresponen a cabals baixos de l'A022 (inferior o igual a 6,8 m³/s). Els resultats de la correcció per any es presenten en la Figura 18. El nombre d'incoherències baixa a 0% en els anys 2009-2011 i 2013-2014, i es redueix per sota del 14% en els anys 2012 i 2015-2023.

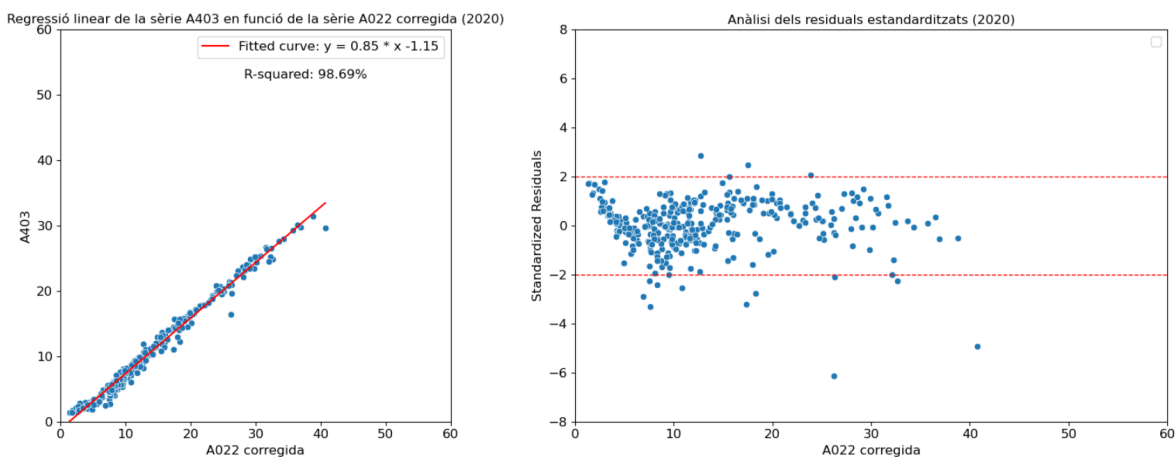


Figura 14. Gràfic de dispersió de les sèries de cabal mig diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant només l'any 2020 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió lineal de la sèrie de cabals de l'estació A403 en funció de la sèrie de l'estació A022 per l'any 2020 (dreta)

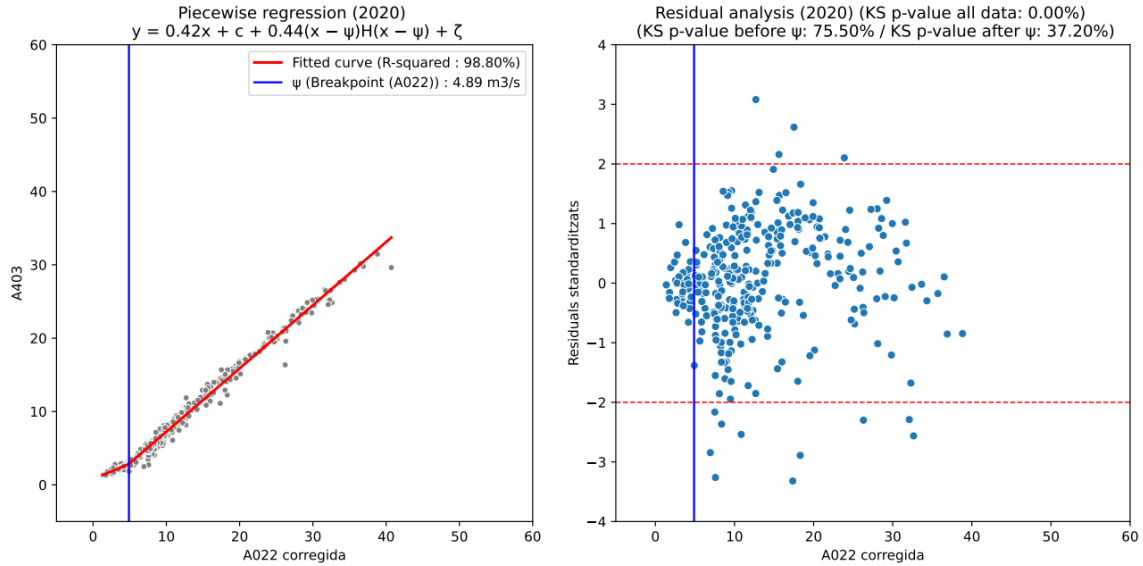


Figura 15. Regressió segmentada de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any 2020 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada amb el resultat del test estadístic Kolgomorov-Smirnov (KS) per avaluar la normalitat de la distribució (si KS p-value > 5% significa que no hi ha prou evidència per descartar la hipòtesis nul·la del test KS i la distribució és normal) (dreta)



Figura 16. Gràfic de dispersió de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de les estacions A403 i A022 considerant només l'any 2022 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió lineal de la sèrie de cabals de l'estació A403 en funció de la sèrie de l'estació A022 per l'any 2022 (dreta)

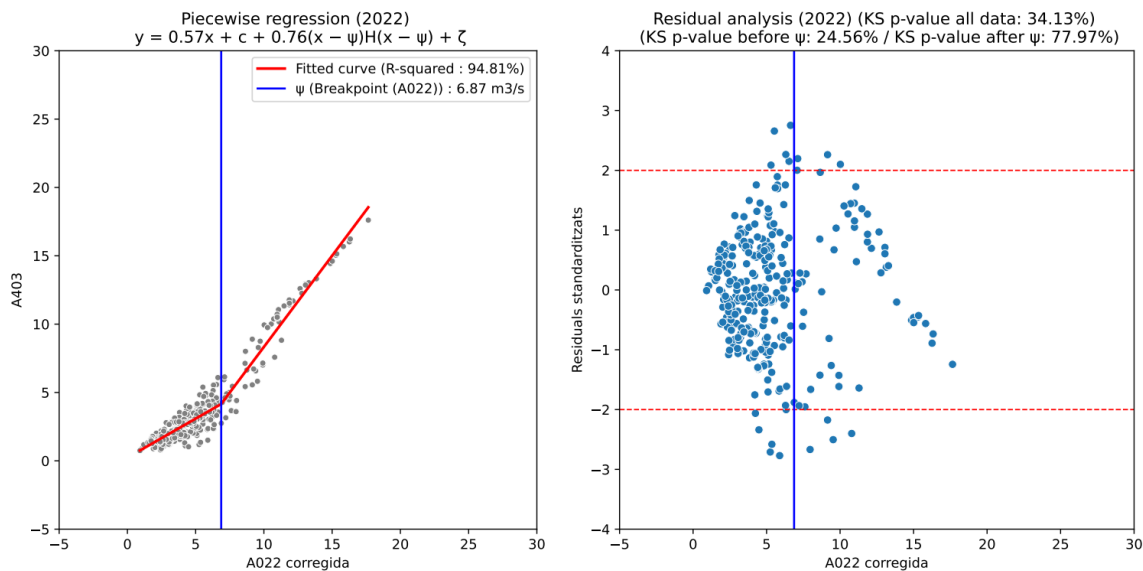


Figura 17. Regressió segmentada de les sèries de cabal mig diari (m³/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any 2022 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada amb el resultat del test estadístic Kolgomorov-Smirnov (KS) per avaluar la normalitat de la distribució (si KS p-value > 5% significa que no hi ha prou evidència per descartar la hipòtesis nul·la del test KS i la distribució és normal) (dreta)

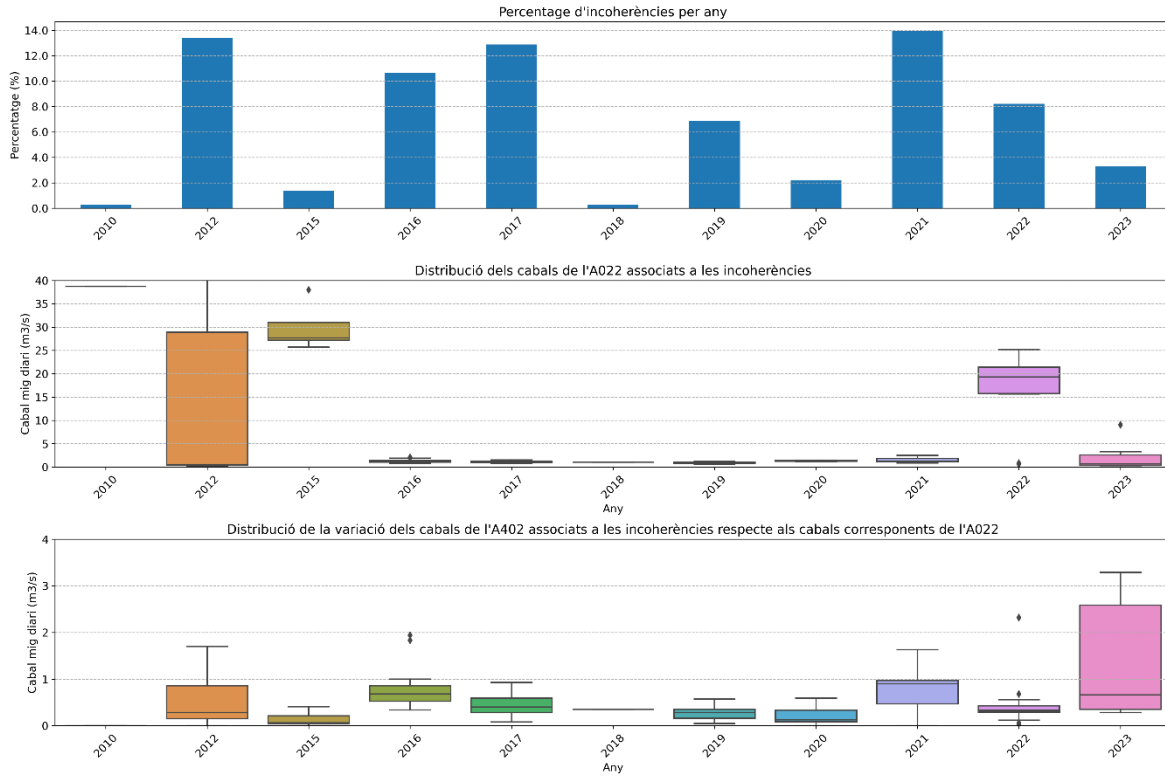


Figura 18. a) Percentatge corresponent al nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022, respecte al total de cabals anuals després d'aplicar la correcció. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les incoherències respecte als cabals corresponents de l'A022

4.2 Tractament del turbinat de FEDA

El cabals mesurats per l'estació A403 es veuen afectats per l'activitat de la central hidroelèctrica d'Encamp operada per FEDA. Aquesta capta l'aigua de la Valira d'Orient i del riu Madriu per emmagatzemar-la al llac d'Engolasters i retornar-la de nou a la Valira d'Orient un cop turbinada a la central.

En aquesta secció es presenta una metodologia per tractar els cabals prèviament corregits de l'A403, amb l'objectiu d'obtenir una sèrie de cabals sense la influència de la hidroelèctrica. Aquesta pot ser d'interès per estudiar trams de riu o conques no subjectes a la influència de les operacions de la central hidroelèctrica d'Encamp.

4.2.1 Anàlisi dels patrons setmanals associats al turbinat

Per tal d'analitzar els patrons setmanals que presenten les sèries temporals de cabals de les estacions A022 i A403, és fonamental explicar la relació entre la variació del cabal del riu Valira d'Orient aigües avall del llac i de forma general, el model d'explotació del llac d'Engolasters per part de FEDA provoca un augment transitori del cabal del riu Valira d'Orient durant els dies laborables degut al buidat controlat del llac. La cota del llac varia des de la seva cota màxima el dilluns al matí fins la seva cota mínima el divendres al vespre (veure Figura 19). Durant el cap de setmana es fa pujar la cota del llac al màxim amb l'aigua que prové dels llacs de Cabana Sorda, Juclar i de la Vall del Riu a través del canal Valira i amb l'aigua que prové del llac de l'Illa a través del canal Madriu.

Durant els períodes amb més aigua (i. e. mesos de primavera), el turbinat es redueix respecte als dies laborables previs sense arribar a 0. En canvi, durant els períodes amb menys aigua (i. e. mesos d'hivern i d'estiu), el turbinat baixa generalment fins a 0 durant els caps de setmana (Figures 20 i 21).

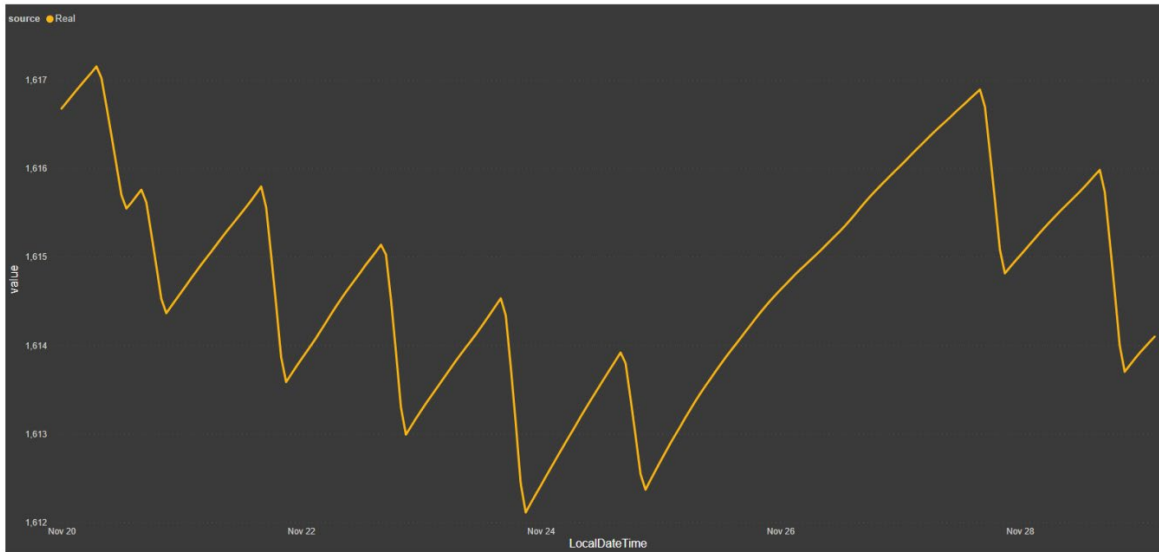


Figura 19. Evolució de la cota del llac d'Engolasters durant una setmana típica. La cota tendeix a baixar fins al seu nivell mínim durant els dies laborables (dilluns-divendres) i pujar durant el cap de setmana fins assolir el seu nivell màxim. Font: FEDA

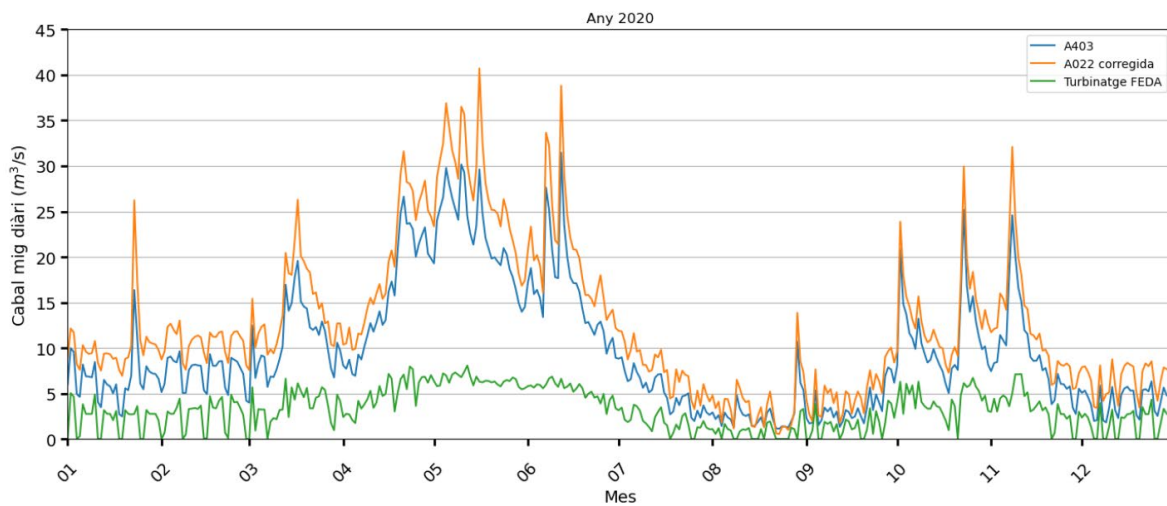


Figura 20. Evolució de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de l'estació A403 i A022 durant l'any 2020. El turbinatge FEDA correspon al cabal d'aigua que es deixa anar al riu Valira d'Orient a través de les turbines de la Central hidroelèctrica d'Encamp

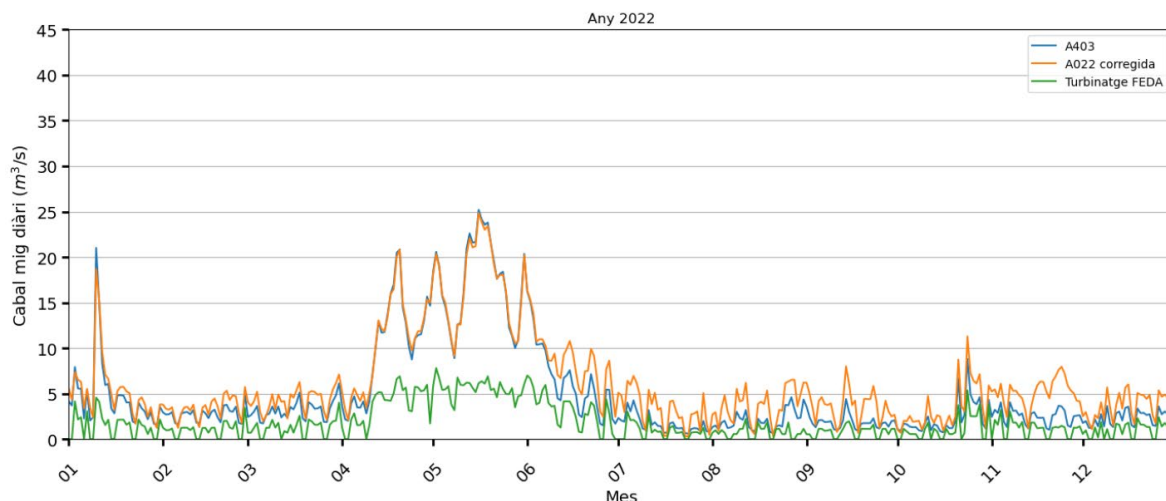


Figura 21. Evolució de les sèries de cabal mig diari (m^3/s) de l'estació A403 i A0222 durant l'any 2022. El turbinat FEDA correspon al cabal d'aigua que es deixa anar al riu Valira d'Orient a través de les turbines de la Central hidroelèctrica d'Encamp

Un cop explicada la relació entre el model d'explotació del llac i els patrons setmanals observats en les sèries històriques de cabals del riu Valira d'Orient, així com en les estacions situades aigües avall, es calcula la mitjana agregada dels cabals per cada dia de la setmana (de dilluns a diumenge) i mes, del període 2009-2023 (veure Figura 22).

Les mitjanes agregades dels cabals associats a les estacions (A022 i A403) i al turbinat de FEDA són significativament més elevades durant els mesos de desgel (abril, maig i juny) en comparació amb la resta de l'any. A més, mostren patrons gairebé idèntics al llarg de la setmana en la majoria dels mesos, caracteritzats per variacions poc significatives entre els dies laborables i una lleugera disminució durant els caps de setmana. Aquest patró setmanal s'alinea amb el model d'explotació del llac d'Engolasters descrit prèviament, cosa que permet afirmar que l'activitat de FEDA exerceix una influència molt significativa en les fluctuacions setmanals dels cabals associats a les estacions hidromètriques.

Tanmateix, s'observen divergències subtils entre els cabals de les estacions A022 i A403 i el turbinat de FEDA durant els mesos de maig, juny i desembre. Aquestes diferències probablement es deuen a factors naturals, com ara el desgel o episodis de precipitacions, que poden afectar de manera diferencial els patrons de cabals entre les estacions i el sistema de turbinat.

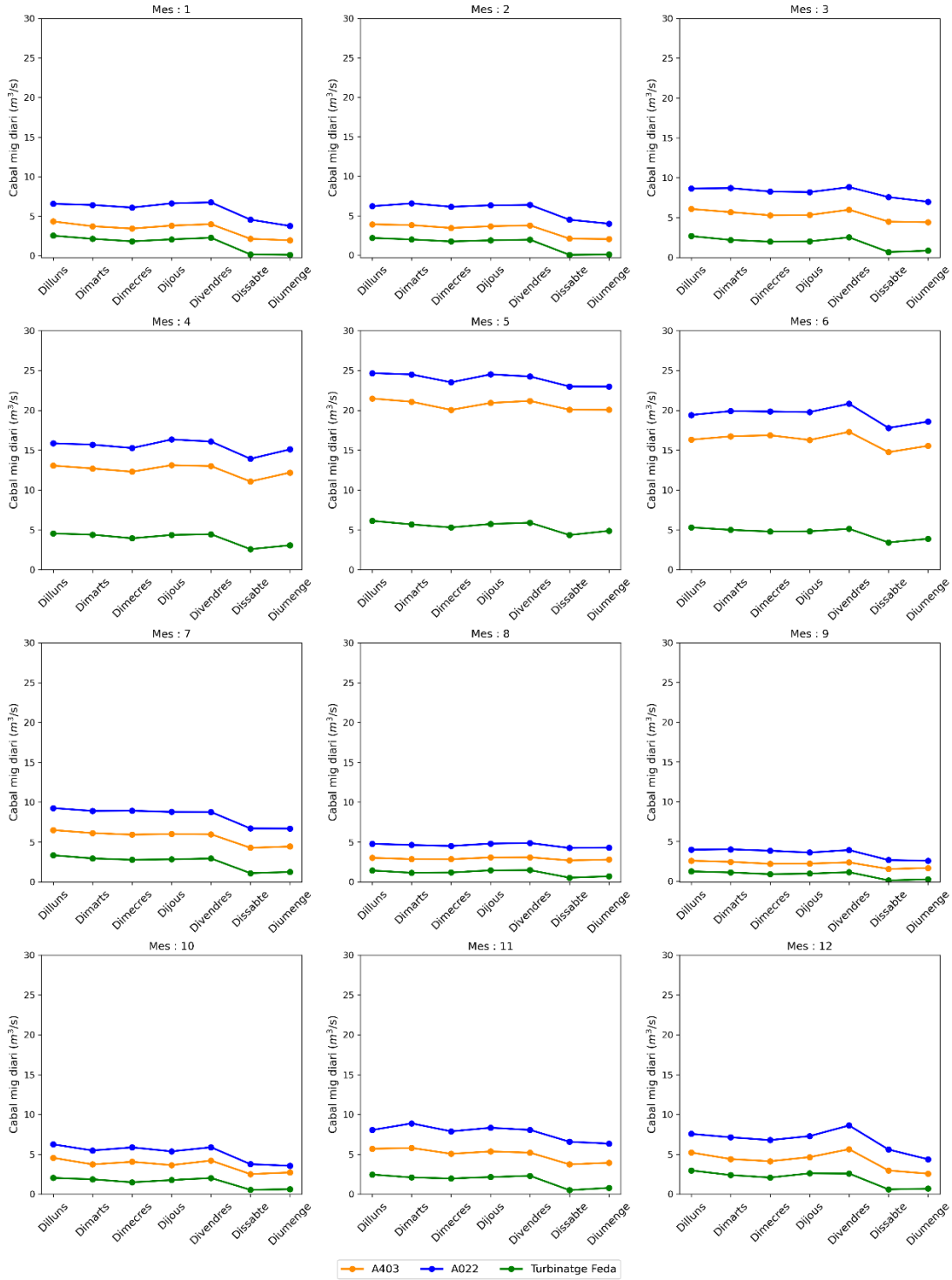


Figura 22. Mitjana agregada dels cabals diaris per dia de la setmana (dilluns – diumenge) i mes durant el període 2009-2023

4.2.2 Obtenció de la sèrie sense la influència del turbinat hidroelèctric

Per tal d'elaborar la sèrie de referència sense la influència de la central hidroelèctrica d'Encamp cal eliminar l'impacte dels patrons setmanals descrits en la secció anterior sense alterar altres components com el volum total d'aigua setmanal. Per fer-ho, es resten de la sèrie A403 els cabals associats al turbinat de la central hidroelèctrica¹⁶. Posteriorment, es reincorpora la mitjana diària del volum d'aigua turbinat per setmana a la sèrie A403. Aquest enfocament permet mantenir constants els volums d'aigua turbinats setmanals, alhora que suprimeix les oscil·lacions setmanals observables en la sèrie. Això garanteix que les fluctuacions intrasetmanals no interfereixin en l'anàlisi, facilitant així l'estudi de les tendències subjacents o dels components no estacionals de la sèrie. Aquesta tècnica és especialment útil en contextos on es busca preservar l'equilibri de les magnituds totals mentre s'eliminen els patrons cíclics locals que podrien distorsionar els resultats (Figura 23).

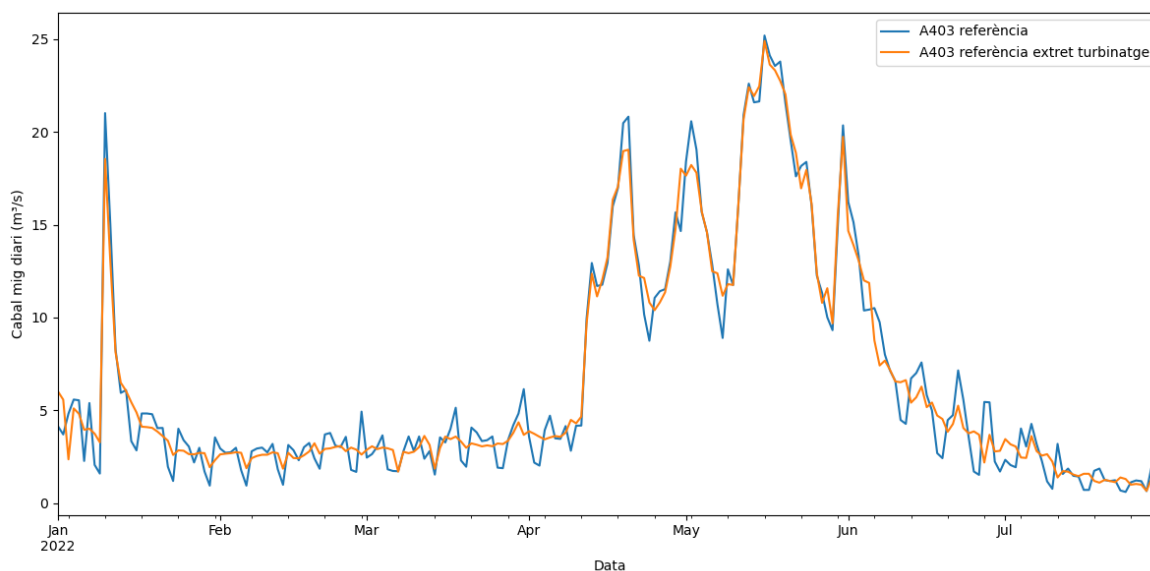


Figura 23. Sèrie de cabals de referència sense la influència de la central hidroelèctrica de FEDA (en taronja) i sèrie A403 original de referència (en blau) entre els mesos de gener i juliol de l'any 2022

¹⁶ Dades horàries proporcionades per FEDA

5. Conclusions

Aquest estudi ha proporcionat una anàlisi exhaustiva de les sèries hidromètriques de la conca del Valira a Andorra, abordant tant les incoherències detectades en les estacions A402 i A403 com els patrons derivats del turbinat de FEDA. Els resultats obtinguts han permès desenvolupar dues sèries de referència¹⁷ robustes, consistents i representatives per a la conca de la Valira a Andorra, basades en l'estació hidromètrica A403. Aquestes sèries constitueixen una eina clau per a l'anàlisi hidrològica en contextos científics i de gestió.

L'ús d'una metodologia de correcció basada en regressions segmentades i el tractament específic dels patrons setmanals ha permès minimitzar els biaixos i incoherències en la sèrie de dades. Aquesta estratègia ha suposat una reducció significativa de les discrepàncies, mantenint la integritat dels volums d'aigua turbinats i assegurant que les sèries de referència reflecteixin amb precisió tant les tendències subjacents com els components no estacionals.

Els resultats d'aquest estudi evidencien la importància d'un calibratge rigorós i d'un manteniment i seguiment continu de les estacions hidromètriques, i el post procés sistemàtic de les dades, especialment en conques sotmeses a una pressió antròpica elevada i a impactes del canvi climàtic, com és el cas d'Andorra. La noves sèries de referència serviran com a base per a futures recerques sobre els recursos hídrics a la regió, incloent-hi l'estimació de cabals ambientals i l'adaptació al canvi global.

Aquest treball no només aporta solucions tècniques per a la gestió hidrològica d'Andorra, sinó que també constitueix un model metodològic aplicable en altres conques amb característiques similars. L'adopció d'aquest enfocament contribuirà a millorar la resiliència hídrica del territori, alineant-se amb els reptes actuals de sostenibilitat i transició energètica.

¹⁷ Sèries disponibles a https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

Referències

AR+I. (2022). *Millora de les dades d'observacions de cabals de les conques fluvials d'Andorra*.

https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/informe_observacions_cabals.pdf

Beguiría, S., Sánchez-Pérez, J. M., Antigüedad, I., Caballero, Y., Lambán, L. J., Quintana-Seguí, P., Llasat, C., Pesado, C., Vidal, J.-P., & Jódar, J. (2019). Evaluation of water resources of the Pyrenees in a context of climate change and adaptation strategies. *Geophysical Research Abstracts*, 21(April), 1. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=140494002&site=ehost-live>

Pilgrim, C. (2021). piecewise-regression (aka segmented regression) in Python. *Journal of Open Source Software*, 6(68), 3859. <https://doi.org/10.21105/joss.03859>