

Títol del treball:

**Aplicació del model GLM (General Lake Model) per a l'estudi del règim
hidrològic de les llacunes litorals de La Pletera**

Estudiant: Víctor González Torà

Grau en Ciències Ambientals

Correu electrònic: victorgonza515@hotmail.com

Tutor: Dr. Francesc Casamitjana Vila

Empresa/Institució: Universitat de Girona

Vistiplau tutor:

Nom del tutor: Francesc Casamitjana Vila

Empresa/Institució: Universitat de Girona

Correu(s) electrònic(s): xavier.casamitjana@udg.edu

Data de dipòsit de la memòria a secretaria acadèmica de coordinació:

Resum

Els aiguamolls litorals són un dels ecosistemes més afectats per l'activitat humana, amb una elevada degradació del seu estat ecològic i, els pocs que en queden estan envoltats de edificacions. Es tracta d'un dels ecosistemes més rics i productius del món que mantenen un cert equilibri amb les entrades del mar. La zona estudiada és la Pletera, un sistema d'aiguamolls situat en la maresma del Baix Empordà, pròxim a la desembocadura del riu Ter, i que ha sigut recientment desurbanitzada gràcies al projecte Life Pletera, el qual pretén recuperar la funcionalitat ecològica completa de la zona.

Fins ara, sempre s'ha mantingut la hipòtesi de que aquestes llacunes només depenen de les entrades superficials del mar i les precipitacions, deixant de banda el rol del aqüífer. En aquest treball s'ha analitzat el règim hidrològic i la salinitat de tres llacunes de La Pletera (Life A, B i C) durant el període comprès entre desembre del 2014 i setembre del 2017. El programa General Lake Model, amb un software de codi obert desenvolupat per Hipsey et al., (2014), es tracta d'un model unidimensional d'equilibri i estratificació d'una massa d'aigua en consonància amb les dades experimentals i meteorològiques. A través d'aquest programa, s'ha determinat per a cada llacuna, l'evolució temporal de la salinitat i dels fluxos subterranis d'entrada i sortida, i s'ha elaborat un balanç de massa que ens ha permès calcular les taxes d'evaporació i demès paràmetres que afecten a les llacunes. A demès, gràcies a les dades meteorològiques s'ha pogut estudiar les oscil·lacions dels nivells de cada llacuna amb el nivell del mar i els seus temporals, entre d'altres.

Els resultats mostren que les llacunes depenen de les aportacions subterrànies per mantenir el seu nivell durant l'època més seca i càlida de l'any i que la salinitat d'aquestes ve marcada per l'evaporació, les aportacions subterrànies i les entrades superficials del mar. A més, s'ha determinat que l'evaporació de cada llacuna depèn de la seva morfologia. A partir d'aquests resultats, el present estudi pretén ser una prova més de la importància que té la connectivitat hidràulica entre les maresmes i els seus aqüífers subjacents i que, requereix el compromís de tothom per conservar-ho.

Resumen

Las lagunas litorales son uno de los ecosistemas más afectados por la actividad humana, con una elevada degradación de su estado ecológico y, los pocos que quedan están rodeados de edificaciones. Se trata de uno de los ecosistemas más ricos y productivos del mundo que mantienen un cierto equilibrio con las entradas del mar. La zona estudiada es la Pletera, un sistema de humedales situado en la marisma del Baix Empordà, próximo a la desembocadura del río Ter, y que ha sido recientemente desurbanizada gracias al proyecto Life Pletera, el cual pretende recuperar la funcionalidad ecológica completa de la zona.

Hasta ahora, siempre se ha mantenido la hipótesis de que estas lagunas sólo dependen de las entradas superficiales del mar y las precipitaciones, dejando de lado el rol del acuífero. En este trabajo se ha analizado el régimen hidrológico y la salinidad de tres lagunas de La Pletera (Life A, B y C) durante el período comprendido entre diciembre de 2014 y septiembre de 2017. El programa General Lake Model, con un software de código abierto desarrollado por Hipsey et al., (2014), se trata de un modelo unidimensional de equilibrio y estratificación de una masa de agua en consonancia con los datos experimentales y meteorológicas. A través de este programa, se ha determinado para cada laguna, el evolución temporal de la salinidad y de los flujos subterráneos de entrada y salida, y se ha elaborado un balance de masa que ha permitido calcular las tasas de evaporación y demás parámetros que afectan a las lagunas. Además, gracias a los datos meteorológicos se ha podido estudiar las oscilaciones de los niveles de cada laguna con el nivel del mar y sus temporales, entre otros.

Los resultados muestran que las lagunas dependen de las aportaciones subterráneas para mantener su nivel durante la época más seca y cálida del año y que la salinidad de estas viene marcada por la evaporación, las aportaciones subterráneas y las entradas superficiales del mar. Además, se ha determinado que la evaporación de cada laguna depende de su morfología. A partir de estos resultados, el presente estudio pretende ser una prueba más de la importancia que tiene la conectividad hidráulica entre las marismas y sus acuíferos subyacentes y que requiere el compromiso de todos para conservarlo.

Abstract

Coastal wetlands are one of the most affected ecosystems by human activity, with a high degradation of their ecological status and, the few remaining are surrounded by buildings. It is one of the richest and most productive ecosystems in the world that maintains a certain balance with the entrances of the sea. The studied area is the Pletera, a wetland system located in the Baix Empordà marsh, close to the mouth of the Ter river, which has recently been de-urbanized thanks to the Life Pletera project, which aims to recover the complete ecological functionality of this zone.

Until now, the hypothesis has always been that these loopholes depend only on surface inlets of the sea and precipitation, leaving aside the role of the aquifer. In this work, the hydrological regime and the salinity of three lagoons of La Pletera (Life A, B and C) were analyzed during the period between December 2014 and September 2017. The General Lake Model program, with open source software developed by Hipsey et al., (2014), is a one-dimensional model of equilibrium and stratification of a body of water in line with experimental and meteorological data. Through this program, we have determined for each lagoon, the temporary evolution of the salinity and the underground inflows and outflows, and to elaborate a balance of mass that has allowed to calculate the rates of evaporation and other parameters that affect the lagoons. Moreover, thanks to the meteorological data, the oscillations of the levels of each lagoon have been studied with the sea level and sea storms, among others.

The results show that lagoons depend on the underground inputs to maintain their level during the driest and warmest period of the year and its salinity is marked by evaporation, underground inputs and surface sea inlets. In addition, it has been determined that the evaporation of each lagoon depends on its morphology. Based on these results, the present study aims to be another proof of the importance of hydraulic connectivity between the marshes and their underlying aquifers and that requires the commitment of all to preserve it.

Índex

1	Introducció	6
1.1	Caracterització de l'àrea d'estudi.....	7
	Localització.....	7
	Geologia i geomorfologia.....	8
	Hidrologia i hidrogeologia.....	9
	Climatologia.....	10
1.2	El model general de llacs (General Lake Model).....	11
2	Objectives	12
3	Metodologia	12
3.1	Recopilació de dades externes.....	12
	Dades meteorològiques i marítimes.....	12
	Nivells d'aigua o cotes de les llacunes.....	12
3.2	Tractament de dades.....	13
	Inversió de dades i calibratge del General Lake Model (GLM).....	13
4	Resultats	17
4.1	Evolució dels nivells de l'aigua.....	17
4.2	Evolució de la salinitat.....	18
4.3	Dinàmica de l'aigua subterrània i l'evaporació.....	20
4.4	Balanç de massa.....	23
5	Discussió	25
6	Conclusions	28
7	Bibliografia	29

1 Introducció

Els aiguamolls litorals són el resultat de la confluència d'aigües continentals i marines, essent un dels ecosistemes més fluctuants i productius del món que proporcionen una àmplia gamma de serveis ecosistèmics a les comunitats costaneres. Aquests serveis inclouen l'estabilització de la línia de costa, l'esmoreïment de les intrusions marines, un flux de matèria i energia entre ecosistemes marins i terrestres, i una reserva de biomassa i biodiversitat (*Menció et al., 2017*). Altrament, aquests ecosistemes han patit una gran disminució, degradació i aïllament degut a la pressió urbanística que s'ha donat al litoral al llarg de la segona meitat del segle XX. Per aquest motiu, una part important dels ecosistemes litorals gaudeixin de figures de protecció legal destinades a la seva preservació (*Gesti et al., 2005*).

Segons la seva connexió amb el mar, els aiguamolls litorals han estat classificats en aiguamolls oberts o tancats, considerant el segon grup com aquells que no tenen cap connexió o un curt període de connexió amb el mar (*Menció et al., 2017*). Els aiguamolls tancats, també anomenats confinats, romanen la major part de l'any aïllats de qualsevol tipus de connexió superficial, i només en els períodes de inundacions, com ara pluges, tempestes marines o riudes, reben aigua superficial continental i/o marina.

La maresma de La Pletera es considerada un ecosistema costaner mediterrani de caràcter confinat i es troba al nord de la desembocadura del riu Ter, en una regió de domini agrícola i turístic (*Badosa et al., 2006; Menció et al., 2017*). Es tracta d'un conjunt de prats inundables que contenen diverses llacunes i aiguamolls costaners, tant de caràcter permanent com temporal, que es van veure afectats per la construcció parcial d'una urbanització a l'any 1987. L'interès ecològic principal és la presència de llacunes permanents halòfiles que permeten la proliferació de poblacions de fartet (*Aphanius iberus*), un peix endèmic de la península ibèrica en perill d'extinció. Actualment, la maresma forma part de l'Espai d'Interès Natural dels "Aiguamolls del Baix Empordà" i la Xarxa Natura 2000. A més, és el focus del tercer projecte Life Pletera (2014-2018) que té com a objectiu restaurar aquesta àrea protegida i recuperar la seva funcionalitat ecològica (*Colomer À., 2014*).

Tot i que les entrades d'aigua superficial són ben conegudes, encara es desconeix si la circulació d'aigua subterrània desenvolupa un rol important en el balanç hídric de la maresma. Fins el moment, les principals aportacions d'aigua s'han atribuït a les pluges i a les entrades superficials del mar. D'una altra banda, en els períodes més secs de cada any, la gran evaporació que pateixen les llacunes degut a les elevades temperatures i la manca de precipitacions significatives, determina que aquestes principals aportacions són insuficients per mantenir el seu nivell hídric (*Badosa et al., 2006; Menció et al., 2017*). Per aquest motiu, en aquest estudi s'han analitzat el caràcter hidrològic i salí de tres llacunes de la maresma (les més representatives) mitjançant el Model General de Llacs (General Lake Model o GLM) amb l'objectiu de calcular si la circulació d'aigua d'aquests aiguamolls ve determinada principalment per aigua superficial o subterrània. A demès, s'ha calculat l'efecte de l'evaporació en les llacunes i els factors que en determinen la seva intensitat.

1.1 Caracterització de l'àrea d'estudi

Localització

La maresma de La Pletera està situada al terme municipal de Torroella de Montgrí (Baix Empordà, Girona), més concretament, a la banda litoral compresa entre la urbanització dels Griells (Estartit) i la desembocadura del riu Ter (*Figura 1*). Es tracta d'un conjunt de llacunes naturals i de nova creació incloses en una àrea rectangular d'uns 556250 m² del tram final de la plana del Baix Ter. Aquesta plana delimita amb el massís del Montgrí al NE, el Mar Mediterrani a l'E i el massís de Begur al SE.

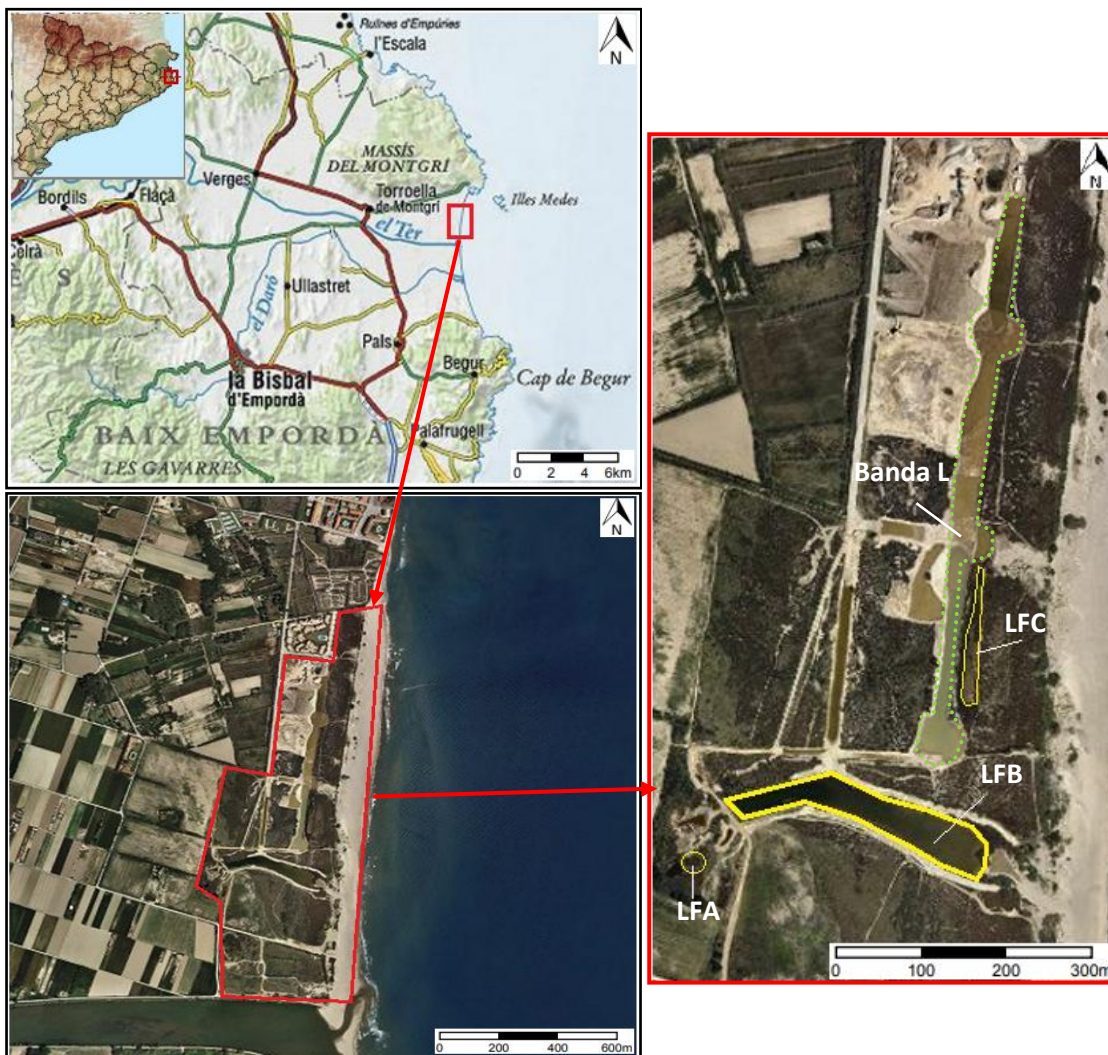


Figura 1: Situació geogràfica de l'àrea d'estudi, amb la indicació de les tres llacunes estudiades. Font: ICGC.cat/Vissir3.

Les llacunes que han sigut objecte d'estudi són: Fra Ramon (Life B, LFB), Bassa del Pi (Life A, LFA) i Bassa Nova (Life C, LFC), es tracta de llacunes permanents, essent Life A i B les úniques llacunes d'origen natural que encara es conserven a la maresma (*Figura 1*).

La llacuna Life B, també anomenada Fra Ramón, està situada al sud de La Pletera. Es tracta d'una llacuna permanent i d'origen natural que formava part d'una antiga llera del riu Ter. Es

distingeix de les altres llacunes de la maresma per la seva morfologia allargada i orientació perpendicular a la costa. Fins al desembre de l'any 2015 aquesta llacuna estava encaixonada per una mota i podia assolir cotes molt altes, però a partir del 2016, amb la major part de la mota rebaixada aquestes cotes tan altes difícilment s'assoliran de nou (*Pascual et al., 2017*).

La llacuna Life A, també anomenada Bassa del Pi, és la llacuna més interior i la més allunyada del mar, uns 500 m (*Pascual et al., 2017*). Antigament formava part de la llacuna Life B, i aproximadament als anys 60 del segle passat, va quedar separada d'aquesta per un capí elevat. Life A és una llacuna permanent i molt petit encara que la seva conca de recepció no es menyspreable.

La llacuna Life C, també anomenada Bassa Nova, és una llacuna artificial de nova creació en el marc del projecte Life Ter Vell Pletera (2002). És una llacuna d'aigua permanent, situada en el primer cordó d'aigua immediatament darrere de les dunes de la platja. És la llacuna més propera al mar i té una conca de recepció relativament extensa. Al llarg del temps, la seva extensió i profunditat ha disminuït una mica degut al retrocés de les dunes. Convé destacar que quan aquesta llacuna s'inunda pot arribar a adquirir la mateixa cota que la banda L de llacunes.

Geologia i geomorfologia

La Pletera es troba aproximadament a 1 m per sobre del nivell del mar i amb un pendent pràcticament nul. S'ubica en la plana litoral del Baix Ter que forma part de la unitat morfoestructural de la Depressió tectònica del Baix Empordà, delimitada pels massissos del Montgrí i de Begur (*Hereu et al., 2012*). La superfície d'aquesta depressió està configurada per abundants materials quaternaris (Holocè), dipositats a conseqüència dels sediments aportats al llarg del temps per part del riu Ter i del mar, formant així la morfologia i estructura geològica actual de la plana litoral. (Figura 2).

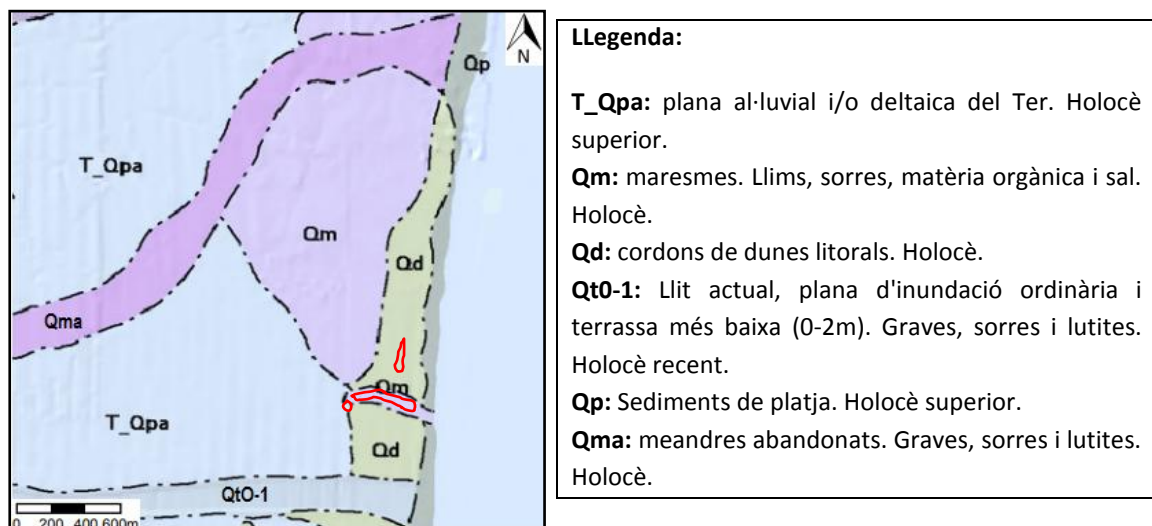


Figura 2: Mapa de les unitats geològiques de l'àrea d'estudi. Els cercles indiquen la situació de les tres llacunes objecte d'estudi. Font: ICGC.cat/Vissir3

La composició de la plana al·luvial (T_Qpa) està formada majoritàriament per graves, sorres i lutites, aquestes últimes, de grà fi. En aquesta plana podem distingir una traça que correspon a

un meandre abandonat (Qma). Es tracta dels últims vestigis del riu Ter abans de ser canalitzat, i presenta una forma allargada i meandriforme pròpia de la dinàmica fluvial. Litològicament aquests meandres abandonats estan formats per una petita part basal de graves seguida d'una predominant capa de sorres de forma que constitueixen zones de flux preferent, especialment subterrani (*Montaner et al., 2010*).

Les zones de maresmes (Qm) estan compostes per llims, sorres, matèria orgànica i sal. Aquestes zones han sigut formades a partir de processos litorals amb la dinàmica fluvio-deltàica. En aquesta zona es localitzen les llacunes litorals permanents d'origen natural. Degut a les inundacions periòdiques que pateixen les maresmes, sobretot per part de les entrades superficials d'aigua de mar, s'hi acumula matèria orgànica i sal que presenten una distribució heterogènia en profunditat (*Illa et al., 2012*).

La platja (Qp), influenciada directament per la dinàmica marina i, els cordons dunars (Qp), originats per processos eòlics, estan principalment constituïts per sorres.

Hidrologia i hidrogeologia

Segons *Illa et al. (2010)*, els elements que conformen la hidrologia de la plana del Baix Ter s'han format a partir de l'acumulació de materials al·luvials i litorals (graves, sorres, llims i argiles). Aquesta acumulació genera una estructura estratigràficament ordenada en múltiples capes de diferents permeabilitats i que es poden agrupar en dos grans unitats que constitueixen les principals formacions hidrològiques de l'àrea d'estudi: l'aqüífer lliure superficial, el qual té un nivell freàtic molt proper a la cota topogràfica, i l'aqüífer profund, semiconfinat i desconnectat del sistema llacunar. Les dos unitats aquífères estan separades per un aquítard intermedi, el qual emmagatzema importants volums hídrics, i l'aigua circula en direcció al mar.

L'aqüífer lliure superficial presenta un comportament directament relacionat amb la dinàmica hidrològica superficial, tant pel que fa al flux de recàrrega/descàrrega com per la seva relació directa amb els diversos elements hidrològics superficials de l'àrea litoral (llacunes, maresmes, riu, recs, sèquies, branques, fonts i surgències). En aquest sentit, constitueix l'aqüífer de referència per comprendre el funcionament dels àmbits hidrològics naturals (*Montaner et al., 2010*). L'aqüífer lliure conta d'uns 15-20 m de gruix, el gradient hidràulic que presenta és de l'ordre de 10-3 unitats de llargada, el coeficient d'emmagatzematge és d'un 15-20% i els valors de transmissivitat oscil·len de 2500 a 11000 m²/d (*ACA, 2004*). El seu comportament hidràulic queda definit per un flux lent i una permeabilitat reduïda (entre 100 i 1000 m/d) a causa de la mateixa litologia dominada per gra fi i puntualment per la impermeabilització que han anat patint les llacunes existents (*Montaner et al., 2010*).

Actualment, aquesta maresma constitueix una zona de transició entre el mar Mediterrani i les terres influenciades pel riu Ter. Les entrades d'aigua procedent de períodes d'inundació del riu han quedat pràcticament eliminades degut a la canalització d'aquest, de manera que les actuals aportacions d'aigua dolça a la maresma provenen bàsicament de l'aigua de pluja i del freàtic. Les entrades d'aigua de mar són crucials en els processos de mescla costaners, que en gran part, determinen les característiques mediambientals de la badia ja que aporten salinitat a les llacunes tant superficialment com a nivell subterrani (*Montaner et al., 2010*). La intrusió

salina es produeix quan l'aigua salada, més densa, s'introdueix des del mar cap als aqüífers costaners. Això es produeix si es redueix el nivell freàtic d'aigua dolça, o s'eleva el nivell mitjà del mar.

Climatologia

La zona d'estudi pertany a la regió de clima mediterrani xerotèric marítim, caracteritzat per temperatures suaus, un període àrid estival de 2-3 mesos i per una distribució irregular de la precipitació (*Gesti et al., 2005*). Presenta una temperatura mitjana anual de 15.6 °C, essent els mesos de juliol i agost els més càlids, i febrer el més fred. La precipitació mitjana anual es d'uns 584 mm, essent el mes d'octubre el més plujós i juliol el més àrid (Figura 3).

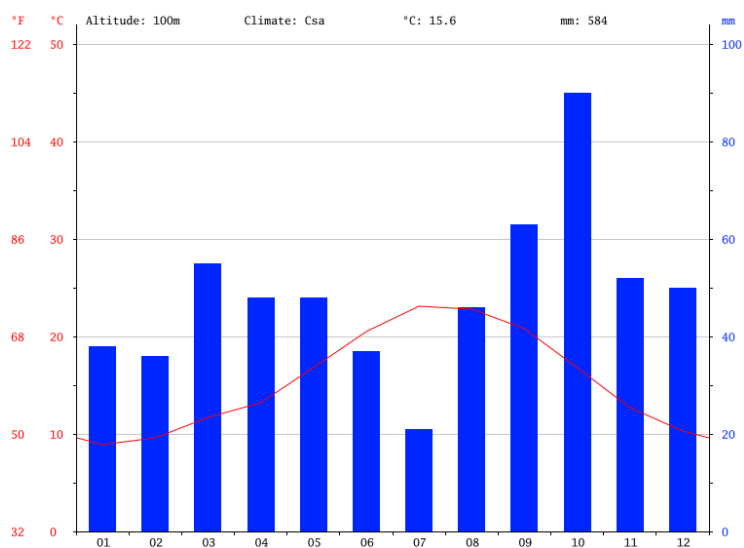


Figura 3: Diagrama ombrotèrmic de l'Estartit (Merkel, A., 2018).

La pluja sol ser la principal causa de les majors inundacions, en extensió i volum d'aigua, i té una funció vital en el modelatge dels sistemes naturals de la maresma. Els vents dominants són de component nord (tramuntana), en especial durant els períodes hivernals, però el vent de llevant (E) pren especial rellevància per la seva relació amb els temporals marins que provoquen la inundació de les àrees de maresma (*Gesti et al., 2005*).

1.2 El model general de llacs (General Lake Model)

El model general de llacs (General Lake Model, GLM) és un programari de codi obert, desenvolupat per *Hipsey et al., (2014)*, que permet crear un model unidimensional d'equilibri i estratificació de l'aigua d'un llac (*The General Lake Model, 2016*). Aquest model funciona amb el suport d'una àmplia biblioteca de models ecològics que donen lloc a simulacions de qualitat de l'aigua i processos dels ecosistemes d'un llac. El GLM és apte per a una àmplia varietat de llacs naturals i artificials, integrant sistemes barrejats i estratificats de qualsevol mida. El GLM calcula perfils verticals de temperatura, salinitat i densitat a partir de l'efecte de les entrades/sortides en el balanç hídric, la mescla i el escalfament/refredament superficial (Figura 4 i 5). A més, permet conèixer les variacions de volum que pateix la llacuna diàriament.

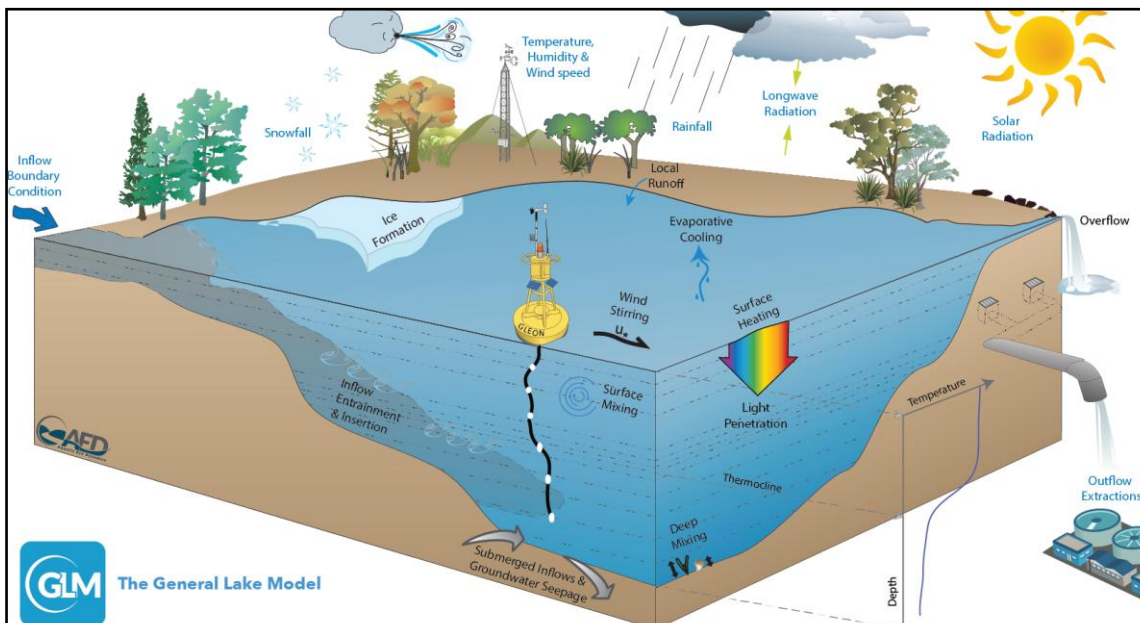


Figura 4: Esquema d'un domini de simulació GLM, informació d'entrada (text blau) i processos clau simulats (text negre). Font: *Hipsey et al., 2014*.

El GLM incorpora una estructura de capa lagrangiana flexible que permet que les capes canviïn el gruix contractant i expandint-se en resposta als fluxos. Quan es disposa d'energia suficient per a obtenir gradients de densitat, dues capes es fusionaran, donant lloc al procés de mescla. Els gruixos de capa són ajustats pel propi model per tal de fer-los coincidir amb el gradient de densitat vertical. El model no assumeix variabilitat horitzontal, per tant, s'ha de garantir que les condicions del llac coincideixin amb aquesta suposició unidimensional vertical.

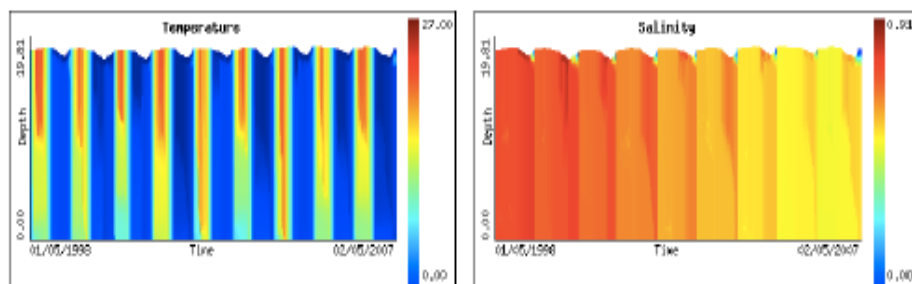


Figura 5: Exemples de models de sortida. Font: *Hipsey et al., 2014*.

2 Objectives

The purpose of this study is the characterization of the hydrological dynamics and the groundwater dependence of La Pletera salt lagoons. Through the use of GLM program, we will evaluate the influence of both surface and groundwater processes on the lagoons and its salinity. Also we will find out if there is a relationship between evaporation and the characteristics of each lagoon. Considering this, the specific objectives will be:

- To study the oscillations of the water lagoons levels with meteorology data.
- To determinate the temporal evolution of the salinity of the lagoons and the main factors that influence salinity variations.
- To calculate the evaporation ratio for each lagoon.
- To determinate the groundwater inflows and outflows of each lagoon and its relationship to establish an hydrological dynamic.

Achieving these objectives will increase the knowledge of the nutrients dynamics and will help for the environmental monitoring and assessment of the wetlands.

3 Metodologia

3.1 Recopilació de dades externes

S'han disposat de diferents dades externes per poder calibrar el Model General de Llacs i elaborar gràfics comparatius que donin suport a les explicacions i hipòtesis desenvolupades en aquest projecte. Aquestes dades han set facilitades pels investigadors del Dept. de Ciències Ambientals de la UdG (Dra. Anna Menció), del Dept. de Física de la UdG (Dr. Xavier Casamitjana) i de l'Estació meteorològica de l'Estartit (Josep Pascual).

Dades meteorològiques i marítimes

Les dades meteorològiques i marítimes que han sigut emprades en aquest estudi són: la precipitació i temperatura mitjana diària, el nivell del mar mitjà diari, i l'altura mínima i màxima de les onades. Aquest conjunt de dades ha servit per elaborar una sèrie de gràfics que permet observar i comparar les pertorbacions de salinitat amb les aportacions d'aigua superficial, ja sigui degut a precipitacions, escorrentia superficial o entrades marines.

Nivells d'aigua o cotes de les llacunes

S'han obtingut els nivells d'aigua de cada una de les llacunes (LFA, LFB i LFC) per poder establir una relació entre l'augment o disminució del nivell de l'aigua amb la variació de la salinitat i les aportacions d'aigua subterrània.

3.2 Tractament de dades

Inversió de dades i calibratge del General Lake Model (GLM)

En aquest estudi s'ha utilitzat el model GLM, un complex model hidrodinàmic per determinar els gradients que no són ben representats per les dades observacionals (Craig A. S., 2015). En aquest apartat, degut a les limitacions de format de la memòria, només es mostra una petita part dels paràmetres que poden ser modificats en el model, tot fent èmfasi en les més significatives.

El GLM requereix diversos fitxers d'entrada (inputs) per poder crear simulacions o models de paràmetres de l'aigua i generar fitxers de sortida (outputs) que recullen les dades calculades (Figura 6).



Figura 6: Diagrama de flux mostrant els fitxers necessaris per al funcionament del model.

Configuració del model físic: *glm.nml*

El fitxer *glm.nml* és el fitxer principal de configuració del model físic que inclou una descripció detallada dels diferents paràmetres que condicionen la dinàmica del llac (Hipsey et al., 2014). Alguns d'aquests paràmetres han set modificats per ajustar-los al model específic de cada llacuna; si algun valor no està present s'assumeixen els valors predeterminats. La major part d'aquests paràmetres són constants meteorològiques que s'utilitzen per a l'estudi dels fluxos d'energia, de les entrades i sortides d'aigua, de l'evaporació, etc.

Les dades predeterminades que utilitza el model són les adaptades per a sistemes d'aiguamolls individuals que tenen en consideració l'equilibri entre tots els recursos hídrics que entren i surten del sistema. Aquest model predeterminat s'aplica a les tres llacunes separatament.

En la Taula 1 es pot observar els principals canvis realitzats per a la llacuna LFB; el GLM se sol utilitzar per masses d'aigua molt grans (embassaments) i, en la majoria de casos els valors predeterminats s'han de reduir o augmentar degut a la poca profunditat màxima que presenten les llacunes.

Taula 1: Variables modificades (al *glm.nml*) pel model de la llacuna LFB. Llegenda: els valors inicials es refereixen als valors predeterminats en el fitxer donats pel GLM; els valors del model són els valors reals utilitzats en els càlculs.

Variable	Descripció	Valor inicial	Valor model
min_layer_vol	Volum de la capa mínima (m ³ *1000)	0.025	0.0025
min_layer_thick	Gruix de la capa mínima	0.005	0.050
max_layer_thick	Gruix de la capa màxima	0.05	0.10
coef_mix_conv	Coefficient de desviament convectiu (eficiència de la barreja)	0.7	0.125
coef_wind_stir	Coefficient d'agitació del vent (eficiència de la barreja)	0	0.23
ce	Coefficient de transferència massiva del flux de calor latent en condicions neutres (evaporació)	0	0.0013
coef_mix_turb	Coefficient de les turbulències inestables (eficiència de la barreja)	0	0.51
coef_mix_stear	Coefficient relacionat amb l'eficiència de barreja dels esdeveniments de cisallament del vent	0	0.20
coef_mix_hyp	Coefficient de turbulència hipolimnètica (eficiència de la barreja)	0	0.5

Les entrades d'aigua venen determinades per la precipitació atmosfèrica (volum que entra directament) i els *inflows* (volums de fluxos d'aigua superficial, subsuperficial i subterrània). Les sortides, en canvi, inclouen l'evaporació (volum que surt directament) i l'*outflow* (en el nostre cas, només subterrani, ja que no hi ha cap extracció artificial d'aigua).

La batimetria de les llacunes es introduïda manualment en el model, a mesura que el model avança a través del temps, els canvis de densitat a causa del escalfament/refredament de superfície, la barreja vertical i els fluxos d'entrada i sortida generen canvis dinàmics i el volum que s'obté com a "output" del model (*lake.csv*) (Menció et al., 2017).

Configuració meteorològica: *met.csv*

En aquest fitxer es proporciona una sèrie temporal de dades meteorològiques diàries amb un nombre fix de columnes (Taula 2).

Taula 2: Taula demostrativa de les diferents columnes del fitxer *met.csv*, que contenen els diferents paràmetres.

Columna <i>met.csv</i>	Unitats	Descripció
time	yyyy-mm-dd	La data de cada dia del període estudiat, (any-mes-dia)
ShortWave	W/m ²	Mitjana diària de radiació d'ona curta
LongWave	W/m ²	Flux incident d'ona llarga calculada a partir de la cobertura del núvols
Clouds	-	Cobertura de núvols
AirTemp	°C	Mitjana diària de la temperatura de l'aire
RelHum	%	Mitjana diària de la humitat relativa
WindSpeed	m/s	Mitjana diària de la velocitat del vent
Rain	m/dia	Precipitació diària acumulada (pluja)
Snow	m/dia	Precipitació diària acumulada (neu)

Les dades de radiació solar han sigut obtingudes de l'estació meteorològica de Sant Pere Pescador (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques de la Generalitat de Catalunya), mentre que la resta ha sigut proporcionada per les Estacions Meteorològiques de L'Estartit i Torroella de Montgrí.

Configuració dels inflows: inflow.csv

Com s'ha dit anteriorment, els *inflows* representen les entrades d'aigua superficial, subsuperficial i subterrànies, i no s'han de confondre amb les entrades directes de precipitació (determinades en el *met.csv*).

Per cada fitxer d'*inflows* (en el nostre cas només un, ja que englobem tots els tipus de fluxos dins d'un mateix fitxer, tot i que en pot haver-hi dos per diferenciar els fluxos superficials i els submergits) hi ha un fitxer d'entrada. Aquest fitxer només accepta dades diàries, ja que el càlcul d'entrada es fa una vegada al dia. Conté quatre columnes obligatòries; temps, flux, temperatura, salinitat (Taula 3).

Taula 3: Taula demostrativa dels diferents paràmetres del fitxer *inflow.csv*.

Columnes <i>inflow.csv</i>	Unitats	Descripció
time	yyyy-mm-dd	La data de cada dia del període estudiat, (any-mes-dia)
flow	ML/dia*	Taxa de flux diari d'entrada
temp	°C	Temperatura diària mitjana de cada flow
salt	mg/L	Mitjana diària de la salinitat que presenta cada flow

*(1 megalitre/dia equivalen a 86.4 m³/s).

Per totes les llacunes s'ha modificat la temperatura i la salinitat predeterminada perquè els resultats del model s'adaptin el més possible als valors experimentals. En aquest cas, s'ha diferenciat dos tipus de fluxos d'entrada, el superficial i el subterrani. Al superficial se li ha assignat la temperatura de l'aire i una salinitat de 10 ppm, considerant que prové de l'escorrentia superficial de les precipitacions, o de 35 ppm, considerant que prové de l'escorrentia superficial de les entrades d'aigua marina (onades). En canvi, al subterrani se li ha assignat una temperatura de 18 °C i considerant que l'aigua sigui d'origen marí o fluvial, una salinitat de 35 ppm o 10-5 ppm, respectivament.

Configuració dels outflows: outflow.csv

Qualsevol número d'*outflows* pot ser configurat com a columnes consecutives en el fitxer *outflow.csv*. Només es requereixen els nivells diaris de flux i les variables de qualitat de l'aigua no són necessàries (Taula 4).

Taula 4: Taula demostrativa dels diferents paràmetres del fitxer *outflow.csv*.

Columnes <i>outflow.csv</i>	Unitats	Descripció
time	yyyy-mm-dd	data
flow	ML/dia*	Taxa diària de flux de sortida

*(1 megalitre/dia equivalen a 86.4 m³/s).

Obtenció del sumari: lake.csv

Un cop s'executa el model (*glm.exe [glm.bat]*), es mostra una finestra amb la simulació dels paràmetres de sortida en viu (Figura 5). A més, es crea un resum diari de la simulació en el fitxer *lake.csv*. Aquest fitxer inclou informació sobre l'escala del llac, relacionada amb l'escalfament i refredament superficial, el balanç de l'aigua del llac i altres mètriques rellevants (Taula 5).

Taula 5: Taula demostrativa dels paràmetres (els més significatius) que conté el fitxer lake.csv.

Variable*	Descripció	Unitats	Variable*	Descripció	Unitats
date	Data	yyyy-mm-dd	Evaporation	Volum diari total d'evaporació	ML
Volume	Volum total diari del llac	ML (1000m ³)	Rain	Volum diari total de precipitació	ML
Tot Inflow Vol	Volum diari total de l'inflow	ML	Lake Level	Mitjana del nivell del llac (diària)	m
Tot Outflow Vol	Volum diari total de l'outflow	ML	Surface Area	L'àrea superficial del llac (diària)	m ²
Max Temp	Temp. màxima diària	°C	Surface Temp	Temperatura superficial diària	°C
Min Temp	Temp. mínima diària	°C			

**Cada variable està representada en una columna diferent dins del fitxer lake.csv.*

Ajustaments finals del model

Un cop obtinguts els inputs, es comparen els volums diaris del model amb els volums coneguts o experimentals i s'ajusten si es necessari. Per ajustar-los, s'incrementen els fluxos d'entrada (*inflows*) o es redueixen els de sortida (*outflows*), ja que les dades de precipitació i evaporació són inamovibles (les condicions climàtiques són les proporcionades per l'estació meteorològica i no es poden modificar).

Per comprovar que les dades de salinitat segueixen la mateixa distribució que les experimentals, s'utilitza el programa Matlab per generar fitxers amb la salinitat superficial i en fondària del model. Les dades d'aquests fitxers es comparen posteriorment amb les salinitats experimentals, permeten així, detectar els dies en que s'ha d'augmentar o disminuir la salinitat del model perquè s'ajustin a les dades reals.

4 Resultats

4.1 Evolució dels nivells de l'aigua

En aquest apartat s'ha determinat la relació que tenen els canvis dels nivells d'aigua a les llacunes respecte a la pluviometria, el nivell del mar i l'efecte dels principals temporals que ocasionen l'entrada d'aigua marina a la maresma (onades de >2.5 m).

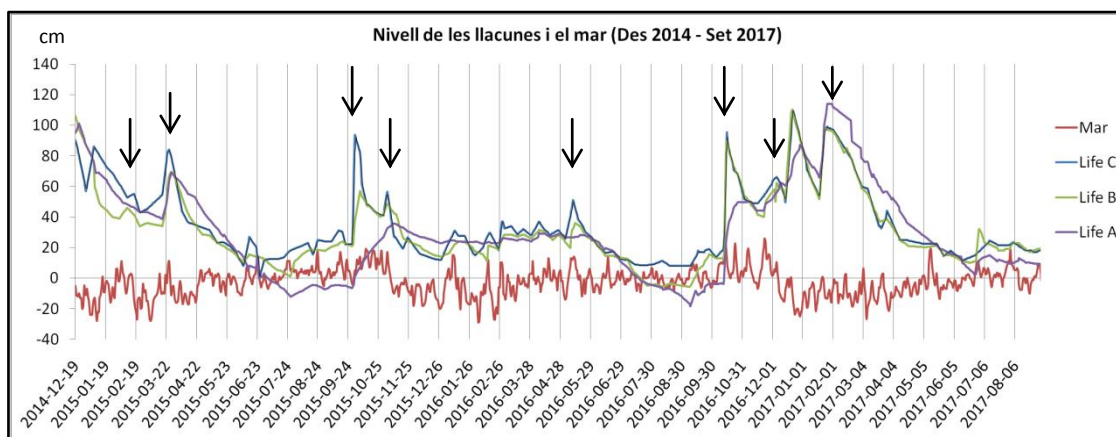


Figura 7: Nivells de l'aigua de les llacunes i del mar (Des 2014 - Set 2017). Amb fletxes, els temporals amb ones significatives (>2.5 m).

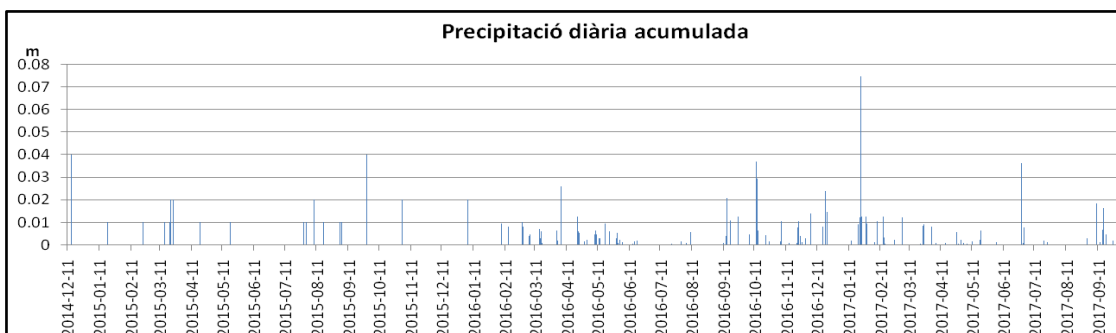


Figura 8: Precipitació diària acumulada (Des 2014 - Set 2017).

Com es pot observar en les figures 7 i 8, les pluges més significatives fan augmentar la cota de les llacunes, i per tant, el seu volum. Generalment, els diferents temporals de mar amb presència d'ones significatives tenen lloc en els pics més alts de cotes, sobretot afectant les llacunes LFB i LFC que són les més pròximes al mar.

En els períodes de sequera estival es quan hi té lloc la major evaporació ja que s'aprecia com les tres llacunes disminueixen de cota considerablement. S'observa com LFC aconsegueix mantenir una cota per sobre el nivell del mar, mentre que LFA es la que perd més aigua, i en conseqüència, la que té la seva cota per sota el nivell del mar durant més dies. Tot i així, les tres llacunes aconsegueixen mantenir un mínim volum d'aigua sense assecar-se completament. L'any 2016 va tenir l'estiu més sec, mentre que l'any 2017 hi té lloc un estiu plujós caracteritzat per abundants pluges a finals de juny que van ajudar a mantenir els nivells de les llacunes per sobre del nivell del mar. Per últim, l'estiu de 2015 es caracteritza per un augment del nivell del mar.

Finalment, s'ha elaborat un gràfic amb els volums calculats a partir de les cotes reals de cada llacuna durant el període estudiat (Figura 9). En ell es pot observar que cada llacuna té una capacitat volumètrica diferent i que LFB pot contenir un volum molt més gran que LFC i LFA. També cal destacar la gran variació de volum al llarg del temps que presenta LFB, i que en canvi, no presenten les demès.

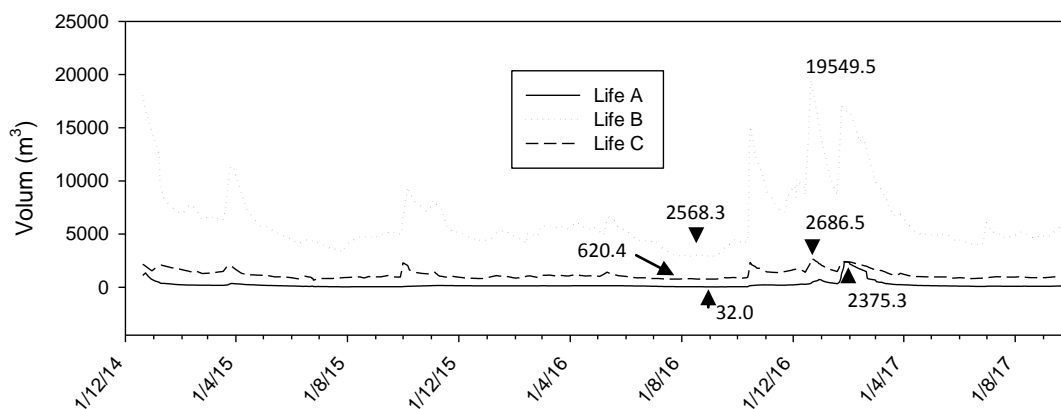


Figura 9: Evolució dels volums d'aigua (m³) durant el període d'estudi (Des 14 - Set 17) de les tres llacunes amb els seus volums màxims i mínims.

4.2 Evolució de la salinitat

Una vegada les dades externes han sigut tractades i posteriorment introduïdes en el GLM (apartat 3.2 de la metodologia), s'ha obtingut per a cada llacuna un model teòric de l'evolució de la seva salinitat en fondària al llarg del temps:

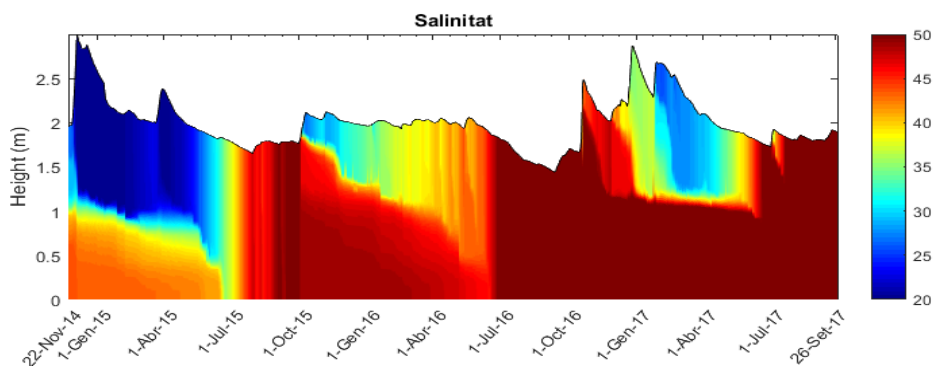


Figura 10: Model teòric de l'evolució de la salinitat a la llacuna LFB.

Model de LFB (Figura 10): Es pot distingir els períodes de gran evaporació i poca pluviositat que presenten valors superiors a 50 ppm en tota la columna d'aigua. Quan tenen lloc episodis de precipitació, s'observa una clara estratificació en la columna d'aigua, especialment quan el nivell és alt, presentant aigües menys salades a prop de la superfície (20 ppm a 30 ppm) i aigües més salines a la part inferior (≥ 50 ppm). Per tant, aquests dos nivells tenen densitats diferents i una elevada dificultat de barreja.

Per últim, es pot observar que les aportacions d'aigua de principis d'octubre de 2016 no aconseguen disminuir la salinitat de la llacuna i aparenta ser una entrada d'aigua salada.

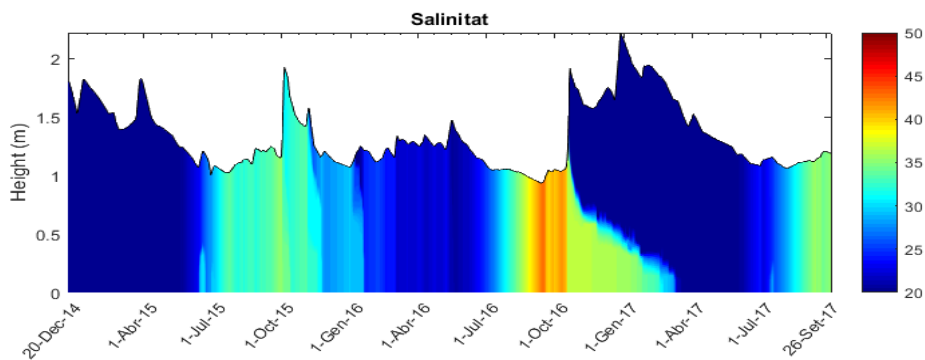


Figura 11: Model teòric de l'evolució de la salinitat a la llacuna LFC.

Model de LFC (Figura 11): En aquest cas, es pot observar una salinitat molt baixa durant la major part de l'any, tant en el nivell més superficial com en el més profund. Només durant l'estiu de 2016 s'observa la columna d'aigua amb valors de salinitat mitjanament elevats (40 ppm). Així doncs, es tracta d'una llacuna amb poca estratificació que no conserva gairebé la seva salinitat al llarg del temps.

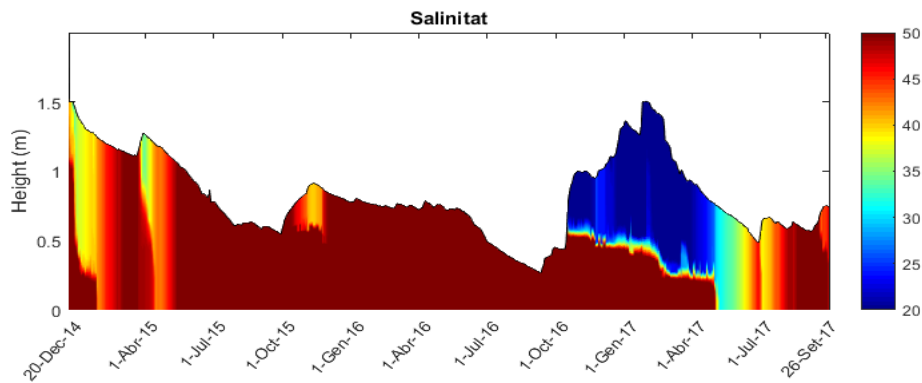


Figura 12: Model teòric de l'evolució de la salinitat a la llacuna LFA.

Model de LFA (Figura 12): Aquesta llacuna presenta una baixa estratificació salina en la seva columna d'aigua, dominada per les elevades salinitats. L'únic fenomen que mitiga la salinitat és l'entrada d'aigua de les precipitacions. Tot i així, en el model es pot observar que la major part dels pics no aconsegueixen disminuir la concentració de sal, i només ho assolixen els pics de finals de 2016 i principis de 2017, els quals formen part de les precipitacions més elevades del període estudiat i que precedeixen el estiu més sec de tots.

Salinitat superficial i en profunditat:

Com s'ha pogut observar en les models anteriors, les llacunes presenten un gradient de salinitats determinat segons quina sigui l'època de l'any. Aquests models tenen assignat un gradient que arriba als 50 ppm per facilitar la comparació qualitativa entre ells. Mitjançant el GLM i el programa *Matlab*, s'ha pogut determinar numèricament les salinitats superficials i en profunditat de les llacunes (Figura 13, 14 i Taula 6):

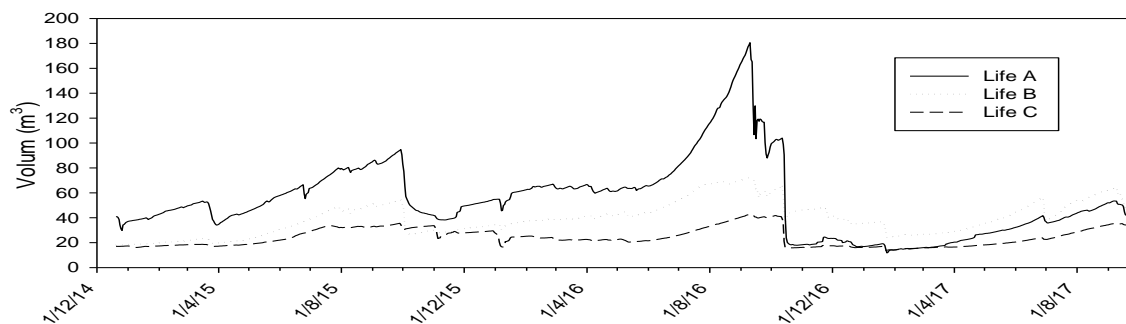


Figura 13: Representació gràfica de la salinitat superficial.

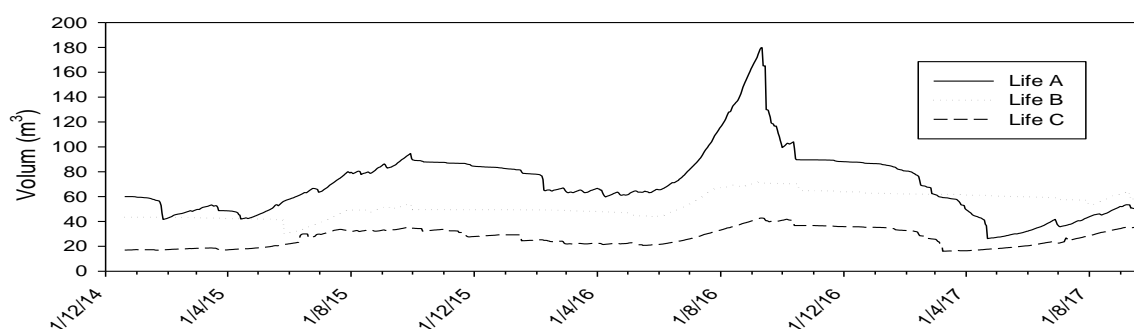


Figura 14: Representació gràfica de la salinitat superficial (a dalt) i la profunda (a baix).

Taula 6: Dades de salinitat de les llacunes estudiades (LFA, LFB i LFC). Llegenda: [Sup], la mitjana de la concentració de sal superficial (en ppm); [Bot], mitjana de la concentració en el fons; Max[sup] i Min[sup], concentració màxima i mínima de sal superficial; Max[bot] i Min[bot], concentració màxima i mínima de sal en el fons.

Llacuna	[Sup] (ppm)	[Bot] (ppm)	Max[sup] (ppm)	Mín[sup] (ppm)	Max[bot] (ppm)	Mín[bot] (ppm)
LFA	54.23	70.52	178.63	11.75	178.63	26.20
LFB	39.74	53.23	70.93	17.82	70.93	29.93
LFC	24.25	27.18	41.84	13.82	41.84	16.05

En la Figura 13, 14 i la Taula 6 es pot comprovar que les màximes salinitats superficials coincideixen amb les màximes en fondària ja que aquests valors es donen quan el nivell de les llacunes es molt baix, i per tant, en un baix gradient de salinitat. LFA arriba a assolir salinitats de 178.63 ppm, cinc vegades la salinitat del mar, però aquests valors poden ser erronis degut a la poca fiabilitat de les dades experimentals quan la llacuna presenta una elevada concentració de sal. LFB presenta uns valors inferiors a LFA, però d'una proporció semblant en les mitjanes. En canvi, LFC segueix un règim amb poca variació salina, on la concentració mitjana de sal en superfície es pràcticament igual que en profunditat.

4.3 Dinàmica de l'aigua subterrània i l'evaporació

Els *inflows* i *outflows*, s'interpreten com la totalitat de les aigües superficials, subsuperficials i subterrànies que flueixen entrant o sortint de les llacunes, apart de les precipitacions i

l'evaporació. Per a poder avaluar la incidència de les aigües subterrànies en les llacunes, s'han elaborat una sèrie de gràfics per a cada estiu ja que és l'època de l'any on hi te lloc la menor quantitat de precipitacions i les llacunes tenen la cota més pròxima al nivell del mar. Per una banda, aquests gràfics consten d'una representació temporal del volum relatiu de cada llacuna; aquest volum relatiu és el volum diari de la llacuna dividit pel seu propi volum del primer dia d'estudi (això ens permet partir d'un volum relatiu de 1) (Figura 15 A). Per l'altra, d'una representació temporal del volum relatiu de cada *inflow*, *outflow* i evaporació; en aquest cas, el volum relatiu és el volum diari que entra o surt de la llacuna degut als *inflows*, *outflows* o evaporació, dividit pel volum de la llacuna aquell dia.

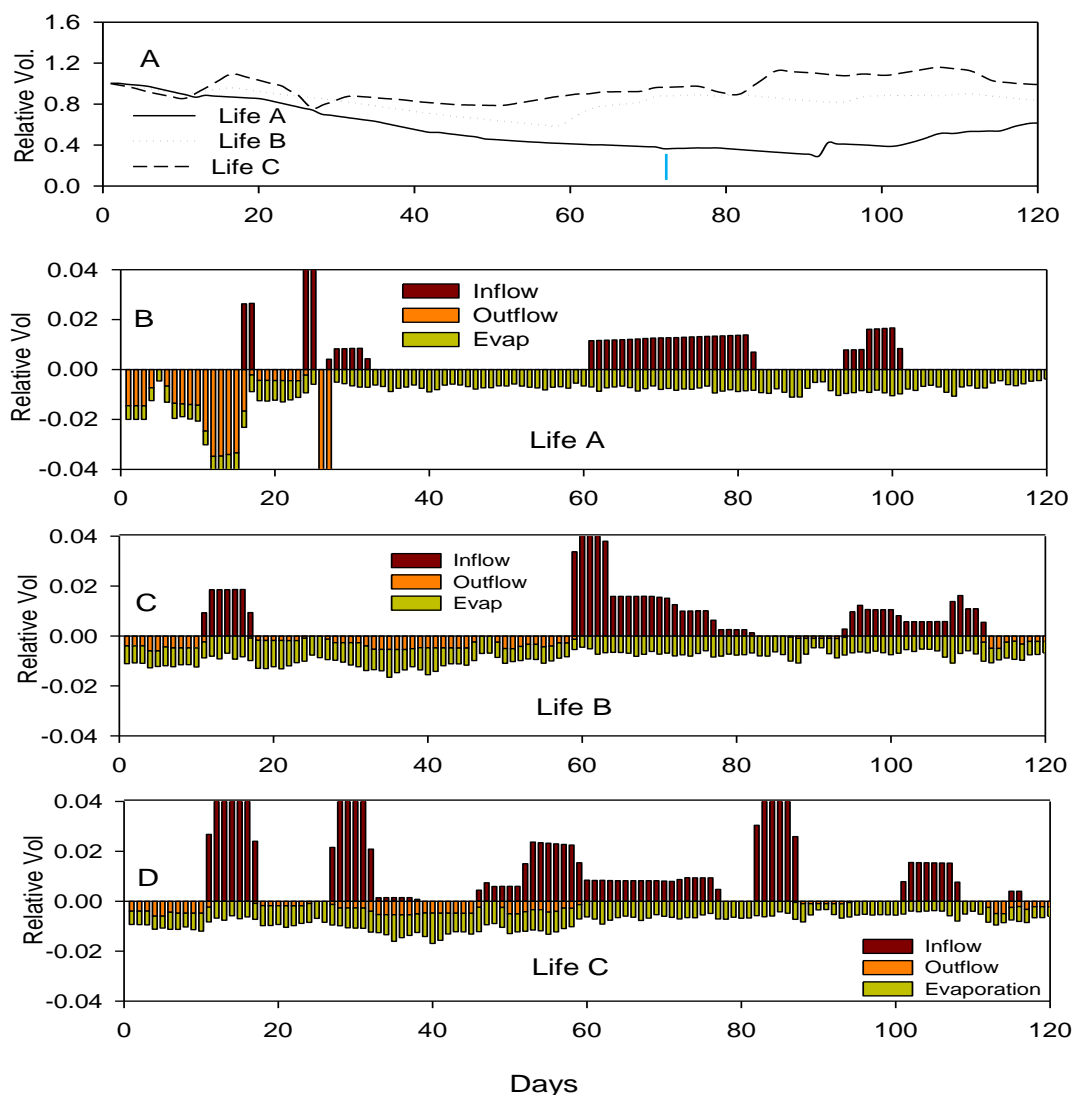


Figura 15: Evolució temporal (en dies) de les tres llacunes per l'estiu 2015 (Jun - Set). Llegenda: 1.A) Vol. relatiu de l'aigua que contenen les llacunes; 1.B) Vol. relatiu de inflows, outflows i evaporació de la llacuna LFA; 1.C) Vol. relat. inflow, outflow i evap. de la llacuna LFB. 1.D) Vol. rel. infl., outfl. i evap. de la llacuna LFC. La línia blava indica un episodi de precipitació significativa (>10 mm).

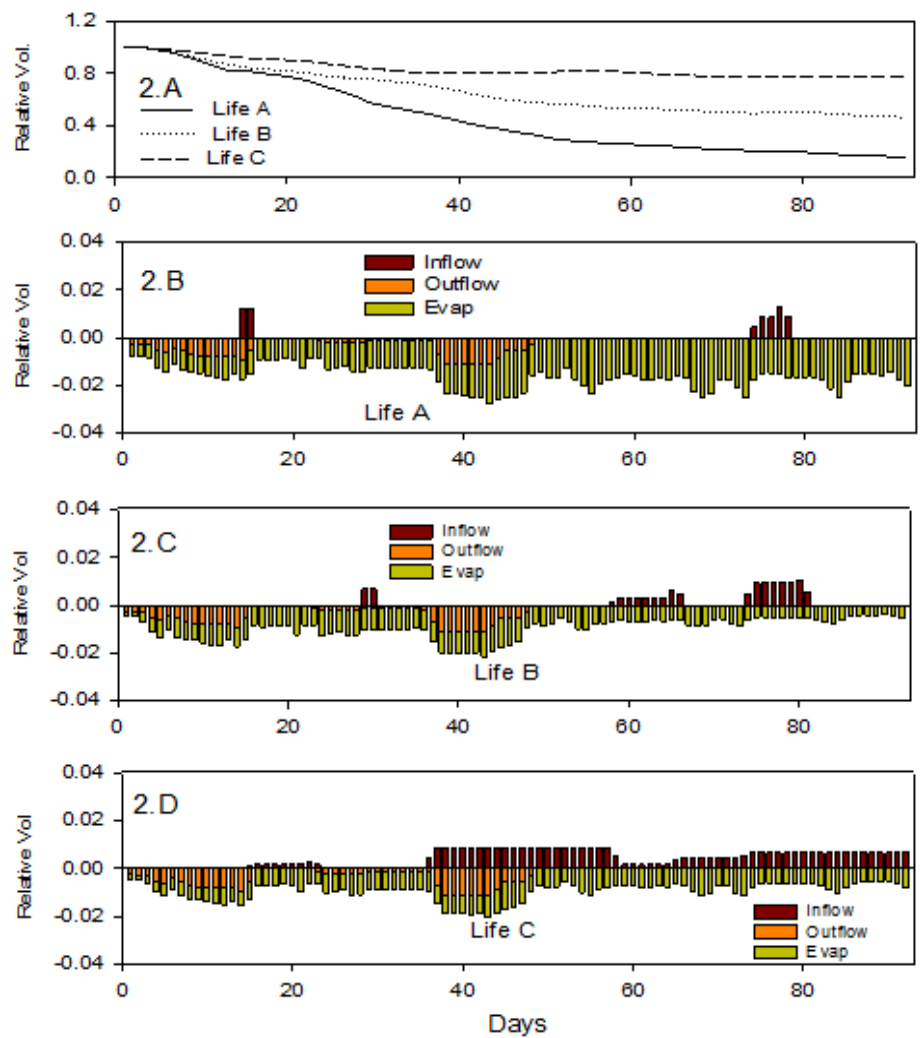


Figura 17: Evolució temporal de les tres llacunes per l'estiu 2016 (Jun - Ago). Veure la llegenda en la figura 14.

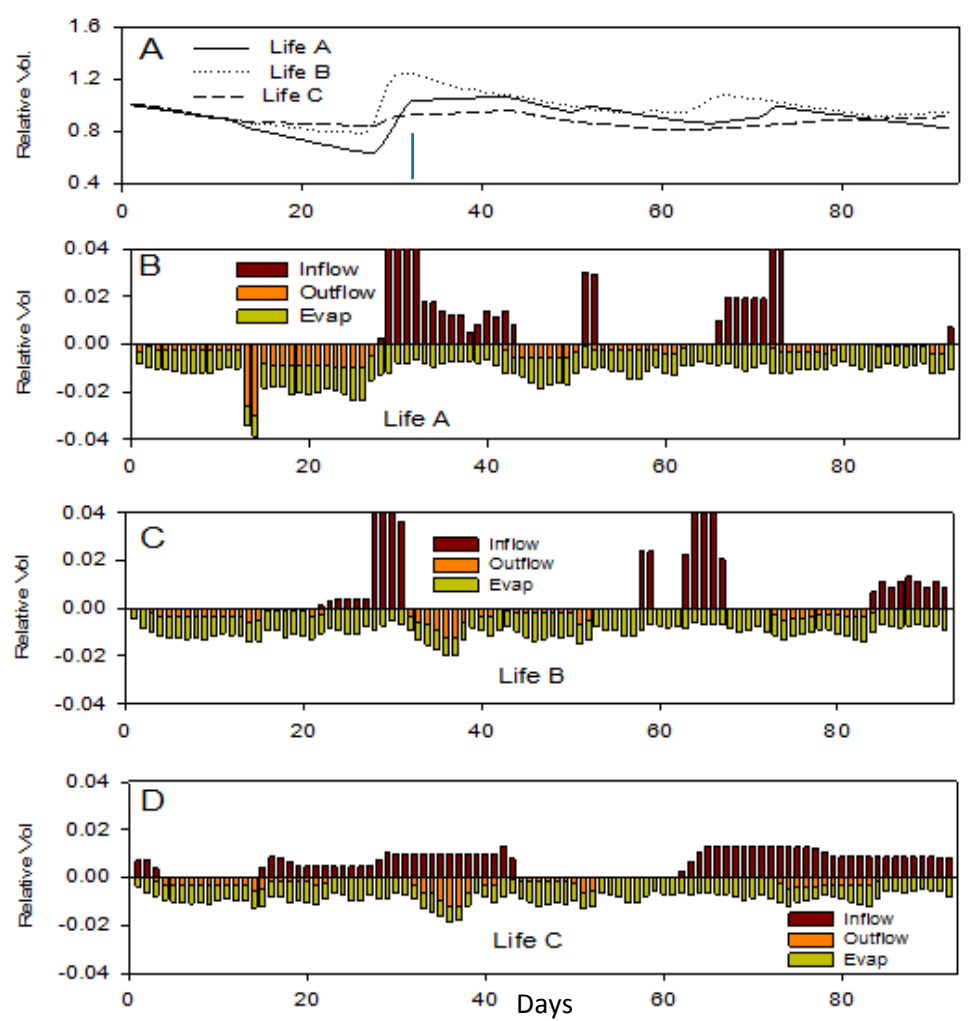


Figura 16: Evolució temporal de les tres llacunes per l'estiu 2017 (Jun - Ago). Veure la llegenda en la figura 14.

Generalment, es pot observar que la llacuna LFC (Fig 14, Fig 15 i Fig 16, D) presenta una major quantitat d'*inflows* respecte a les altres llacunes; aquests *inflows* no sempre presenten un gran volum relatiu però són molt freqüents i regulars. D'altra banda, la llacuna LFA presenta els valors més elevats d'evaporació i d'*outflows*, mentre que LFB presenta un règim d'*inflows* semblant a LFA però, en canvi, pateix uns *outflows* més regulars i de menys volum relatiu. Altrament, en la figura 14 (1.B), la llacuna LFA pateix una sèrie d'*outflows* molt elevats (>0.04) i uns *inflows* irregulars durant els primers 20 dies de juny del 2015, el mateix passa pel juny de 2017 (Fig. 16, B); durant aquest període de 20 dies no s'han registrat precipitacions significatives, i possiblement sigui degut al flux subterrani.

En l'estiu de 2015, durant el mes de juliol fins a mitjans d'agost (del dia 40 al 70), s'observa un augment en el nombre d'*inflows*; les llacunes més afectades per aquests augments són LFB i LFC, les més pròximes al mar; en aquest període, segons les dades meteorològiques (Figura 7 i 8), el nivell del mar va pujar significativament degut a les baixes pressions i les precipitacions no varen arribar fins més tard (dia 75) i no es van detectar onades importants. Per tant, es pot atribuir aquestes entrades a la intrusió marina.

Per una banda, l'estiu 2016 (Figura 15) representa el millor exemplar per observar les aportacions d'aigua subterrània ja que no s'hi va registrar precipitació alguna (exceptuant rosades). Els *inflows* que s'hi observen no contenen un volum relatiu gaire alt però es pot suposar que són degut a la intrusió marina ja que en aquesta època de l'any el aquífer marí té més força respecte el fluvial. Per l'altra, l'estiu de 2017 (Figura 16), és un estiu poc representatiu degut a les pluges significatives que van tenir lloc a finals de juliol les quals emmascaren les entrades subterrànies. Tot i així es pot observar que la llacuna que rep més *inflows* en període de precipitacions és LFA.

4.4 Balanç de massa

Gràcies a la informació proporcionada pel GLM, es pot confeccionar un balanç de massa a partir de les entrades i sortides de cada estiu. Com a entrades, hi han la precipitació i l'*inflow*, en canvi, com a sortides, l'evaporació i l'*outflow*. En aquest cas, s'ha fet dos tipus de balanços per a cada estiu; el primer (Taula 7, banda esquerra) s'ha elaborat a partir de les entrades i sortides totals, mentre que el segon (Taula 7, banda dreta), s'ha fet mitjançant el promig dels m³ d'aigua que entren o surten diàriament de la llacuna, dividit pel volum diari de la llacuna.

Taula 7: Balanç de massa per a cada llacuna (LFA, LFB i LFC) per l'estiu 2015 (Jun - Set). Llegendra: Vin, volum inicial (m^3); Vfin, volum final; Inf., inflow total (m^3); Out., outflow total; Evap., evaporació total (m^3); Rain, entrades totals de pluja (m^3); Total, sumatori de sortides i entrades (inflows, outflows, rain i evaporació); S/V, mitjana de la relació superfície/volum diària; Inf./V, taxa de variació mitjana del volum de la llacuna respecte les entrades d'inflows diàries (d^{-1}); Out./V, respecte sortides d'outflows; Evap./V, respecte sortides d'evaporació; Rain/V, respecte entrades de pluja; Total/V, sumatori de les taxes de variació anteriors).

m^3	Life A	Life B	Life C	dia^{-1}	Life A	Life B	Life C
V.in.	108.00	4087.51	895.70	S/V	3.88	2.56	0.76
Inf.	54.86	2425.60	1073.41	Inf./V	0.0086	0.0061	0.0104
Out.	-70.67	-726.55	-542.17	Out./V	-0.0087	-0.0018	-0.0054
Evap.	-71.16	-3010.30	-669.70	Evap./V	-0.0124	-0.0073	-0.0066
Rain	11.68	588.77	104.75	Rain/V	0.0024	0.0014	0.0010
Total	-75.29	-722.48	-33.70	Total/V	-0.0102	-0.0016	-0.0006
V.fin.	32.71	3365.03	862.00				

Taula 8: Balanç de massa per a cada llacuna (LFA, LFB i LFC) per l'estiu 2016 (Jun - Ago). Llegendra: Taula 7.

m^3	Life A	Life B	Life C	dia^{-1}	Life A	Life B	Life C
V.in.	116.62	5546.57	956.33	S/V	6.57	2.42	1.88
Inf.	3.32	338.05	295.98	Inf./V	0.0007	0.0012	0.0042
Out.	-50.37	-903.78	-21.14	Out./V	-0.0081	-0.0023	-0.0003
Evap.	-58.49	-2566.55	-535.82	Evap./V	-0.0143	-0.0076	-0.0074
Rain	4.08	154.26	24.67	Rain/V	0.0008	0.0004	0.0003
Total	-101.46	-2978.02	-236.31	Total/V	-0.0209	-0.0083	-0.0032
V. fin.	15.16	2568.55	720.02				

Taula 9: Balanç de massa per a cada llacuna (LFA, LFB i LFC) per l'estiu 2017 (Jun - Ago). Llegendra: Taula 7.

m^3	Life A	Life B	Life C	dia^{-1}	Life A	Life B	Life C
V.in.	101.95	4740.26	934.82	S/V	2.67	2.68	1.81
Inf.	74.25	3388.71	471.29	Inf./V	0.0085	0.0076	0.0062
Out.	-27.53	-906.75	-93.61	Out./V	-0.0034	-0.0020	-0.0012
Evap.	-75.87	-3503.54	-539.42	Evap/V	-0.0090	-0.0083	-0.0071
Rain	10.89	613.31	73.41	Rain/V	0.0014	0.0012	0.0009
Total	-18.26	-408.27	-88.33	Total/V	-0.0025	-0.0014	-0.0011
V.fin.	83.69	4331.99	846.49				

Com es pot observar en les Taules 7, 8 i 9, la llacuna LFA és la que presenta les taxes de sortida més elevades en tots tres estius (Out/V i Evap/V), i LFC, les menys elevades (exceptuant Out/V de l'estiu 2015). LFC és la llacuna que presenta la relació S/V més baixa, mentre que LFA sol presentar la més alta, exceptuant l'estiu de 2017; establint així una relació entre la evaporació i la superfície/volum de cada llacuna. A més a més, LFA es la que perd més aigua al llarg de tots els estius (Total/V) i, altre cop, LFC, la que menys; això explicaria el perquè del baix volum de LFA i el volum sense variacions de LFC.

En tots els estius, la llacuna amb la major taxa d'entrades de pluja (Rain/V) és LFA i, LFC presenta les més baixes. Per una banda, durant els estius influenciats per l'alt nivell del mar i

l'augment de la intrusió marina (estius 2015 i 2016, respectivament) s'observa com LFC és la llacuna que presenta les taxes Inf/V més elevades, mentre que per l'altra, en l'estiu de 2017, caracteritzat per les precipitacions de principis de juliol, la llacuna amb aquesta taxa més alta és LFA, en canvi, LFC li correspon la més baixa.

Finalment, es pot observar que la llacuna LFB presenta unes taxes intermèdies entre LFA i LFC, exceptuant l'estiu de 2017 en que presenta la entrada subterrània (Inf/V) més baixa, segurament, degut a l'emascament d'aquestes dades per l'elevada pluviometria de finals de juliol que atorga la major taxa Inf/V a la llacuna LFA.

5 Discussió

Com s'ha pogut observar en els resultats, les llacunes més pròximes al mar, LFC i LFB, són les que estan més influenciades per les entrades del mar, tant superficials com subterrànies. Tot i això, aquestes dos llacunes presenten salinitats molt diferents l'una de l'altra, i per tant, les entrades d'aigua marina no és l'únic factor q afecta en la seva salinitat.

Per una banda, s'ha pogut comprovar que en els períodes de precipitacions durant l'estiu, els *inflows* augmentaven en número i volum, mentre que en els períodes secs, els *inflows* es mantien en un volum baix, essent més nombrosos a LFC. Això permet deduir la interacció entre l'aquífer marí i el terrestre amb les llacunes; quan no hi han precipitacions i una elevada evaporació, l'aquífer terrestre no té força per contrarestar la intrusió marina i per tant les llacunes reben *inflows* subterrànies del mar. Tot i així, no es detecta variacions significatives en les salinitats profundes i per tant, es pot deduir de que aquestes interaccions entre els aquífers genera un moviment d'aigua subterrani, d'entrada i sortida, que desplaça l'aigua de les llacunes en direcció al mar o terra endins, depenent de l'època de l'any, creant una reserva d'aigua en el aquífer adjacent de cada llacuna amb les característiques d'aquestes. Per tant les aportacions d'aigua subterrània no deixen de ser la pròpia aigua de les llacunes i per això la salinitat en fondària tendeix a ser constant.

Altrament, com s'ha comprovat en els resultats, la llacuna LFC és la més influenciada per la dinàmica marina, tant superficialment com de manera subterrània ja que augmenta la seva cota els dies en que hi havia temporals i rep la major taxa d'*inflows* en època de sequera quan la intrusió marina és més forta o en períodes on les baixes pressions fan augmentar el nivell del mar.

Per l'altra, la llacuna LFA presenta una gran influència de les precipitacions, essent la seva entrada principal d'aigua, i una gran taxa de pèrdua del seu volum degut en primera instància a l'elevada evaporació i en segona, als elevats *outflows*. En períodes de sequera i elevades evaporacions, com per exemple l'estiu de 2016, aquesta llacuna presenta la relació S/V més gran; això permet deduir que en episodis de grans evaporacions la llacuna amb la relació S/V més gran patirà una taxa d'evaporació més elevada. Contràriament, en l'estiu de 2017, en el qual hi va haver un episodi de fortes precipitacions, aquesta afirmació no es compleix ja que LFA tot i presentar la taxa d'evaporació més elevada, no presenta la relació S/V més gran. Aquest fet pot ser causat, per una banda, per la pròpia morfologia de LFA; on les precipitacions

significatives fan augmentar el volum ràpidament, disminuint així la relació S/V. I per l'altra, degut a les aportacions subterrànies de cada llacuna, les quals presenten una temperatura més baixa que la de la superfície, refrescant així a les llacunes i per tant, disminuint l'evaporació d'aquestes; LFA al ser la llacuna que rep menys *inflows* subterranis, també presenta una major evaporació.

Per últim, es pot distingir que hi han aportacions d'aigua que no aconsegueixen disminuir la salinitat de la llacuna i que aparenta ser una entrada d'aigua salada, aquesta situació ha sigut detectada durant l'octubre i novembre de 2016 en la llacuna LFB (Figura 10). Aquest fet pot ser explicat per la sal acumulada a la fracció de llacuna més pròxima al mar, que és també la primera en assecar-se (Figura 18). Les entrades de mar que no aconsegueixen arribar a la part inundada de la llacuna i es queden a mig camí, l'evaporació i la dessecació provoquen una acumulació de sal al sòl al llarg de l'estació càlida que, quan hi ha precipitacions i/o entrades superficials marines, l'aigua arrastra aquesta aglomeració de sal, aportant a la llacuna aigua amb una salinitat molt elevada. Aquesta aigua salada també s'infiltra, aportant altes concentracions de sal als nivells subterranis i per tant, al rentat esmentat anteriorment.



Figura 18: Fotografia de la part seca de LFB, on es pot observar les volanderes de sal i nutrients acumulats. Font: pròpia.

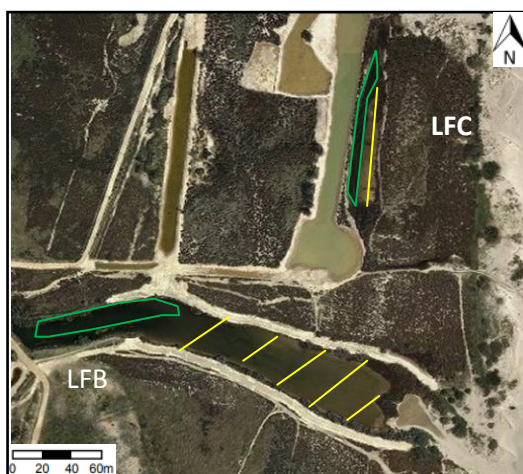


Figura 19: Ortofotomapa amb la distribució espacial de les llacunes LFB i LFC. Amb groc, la superfície de llacuna que roman seca la major part de l'any; en verd, la part més profunda de la llacuna que està inundada permanentment.

Criteris ètics i de sostenibilitat

La Pletera suposa una reserva per a les llacunes costaneres del Mediterrani, un paratge natural molt escàs degut a l'elevada urbanització de la costa mediterrània. Aquest medi és molt delicat ja que depèn d'una salinitat específica proporcionada per la barreja entre l'aigua dolça i salada. És per aquest motiu, que s'ha de garantir que cap element artificial alteri o impedeixi el flux natural de l'aigua.

Fins fa relativament poc, la Pletera estava urbanitzada i, gràcies a la retirada dels elements constructius, a la excavació de noves llacunes i a l'establiment d'una xarxa de protecció, aquesta zona torna poc a poc a naturalitzar-se. Tot i així, es necessita un cert temps per recuperar i aconseguir altre cop la funcionalitat ecològica de la zona i per aquest motiu, la seva planificació territorial ha de contemplar una estricta ordenació de l'accés i ús públic, tot lligat amb un bon manteniment de l'espai.

Finalment, aquest treball ha de servir per ampliar i complementar el coneixement de la dinàmica de les llacunes i facilitar així la seva gestió. A més, ha de servir com una prova més per educar a la població i per demostrar que la recerca científica es pot dur a terme d'una forma més sostenible i amb el mínim impacte al medi ambient mitjançant l'ús de programes informàtics com el GLM, que permeten generar models teòrics del que succeeix a l'àrea d'estudi.

6 Conclusions

The goal of this project has been to know the hydrological dynamics and the salinity variations of la Pletera lagoons. With the GLM program, we studied the period between December 2014 and September 2017 and the conclusions of our research are:

1. The three lagoons depend on underground entrances to maintain their water level during the summer, when precipitation is scarce and evaporation is maximum. These entrances are more regular in LFC, which is the closest lagoon to the sea, and rarer in LFA, the farthest one.
2. In contrast, the rainfall fluxes affect more to the furthest lagoon LFA, followed by LFB and finally LFC, the closest to the sea.
3. Evaporation is the most important factor that determines the salinity of the lagoons, if evaporation increases, the salinity of the lagoons will increase too. This evaporation depends largely on the S / V ratio and morphological characteristics of each lagoon, but also on the underground fluxes.
4. The salinity at the bottom of the lagoons stays more constant than the surface due to underground washing and mixing processes between water from aquifers and lagoons. Depending on the time of the year, the freshwater flux or the marine flux will be stronger creating either a water flux from land to sea or in the reverse sense, and this creates a movement of water in the direction of the sea or inland, which takes the salinity of the lagoons creating a reserve of water with the quality of the lagoon itself in its subsoil. Therefore, the salinity of the subterranean water supplies will depend on the salinity of the bottom of each lagoon.
5. Otherwise, the superficial salinity of the lagoons is more fluctuating due to the waves and precipitation inputs.

In summary, it has been shown that the Pletera salt marshes is an ecosystem that is influenced by underground dynamics. Also, this dynamics helps to maintain the level of lagoons and to preserve the saline characteristics of each one. Therefore, it is necessary to maintain the hydraulic connection between the lagoons and the underlying aquifer, avoiding the construction of barriers that prevent or alter this underground water flow.

7 Bibliografia

- Agència Catalana de l'Aigua (ACA), 2004. Fitxes de caracterització inicial, pressions i impactes de les masses d'aigua subterrànies. Fluviodeltaic del Ter. Departament de Territori i Sostenibilitat. Recuperat de: http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P25400181961268046736218&_nfls=false
- Alexander Merkel, 2018, Clima: l'Estartit, Climate-Data.org. Recuperat de: <https://es.climate-data.org/location/997813/>
- Badosa, A., Boix, D., Brucet, S., López-Flores, R., Quintana, X. D., 2006. Nutrients and zooplankton composition and dynamics in relation to the hydrological pattern in a confined Mediterranean salt marsh (NE Iberian Peninsula). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66, 513-522.
- Colomer, A., 2014. LIFE PLETERA. Recuperat de: <http://lifepletera.com>
- Craig, A. Snorheim, 2015, Meteorological drivers of oxygen depletion in Lake Mendota, University of Wisconsin-Madison. Recuperat de: https://lter.limnology.wisc.edu/sites/default/files/Snorheim_thesis%202015.pdf
- Gesti, J., Badosa, A., & Quintana, X. (2005). PLA DE GESTIÓ DELS ESPAIS NATURALS DEL TER VELL I LA PLETERA (TORROELLA DE MONTGRÍ-L'ESTARTIT, BAIX EMPORDÀ) En el marc del Projecte LIFE-Natura: Restauració i ordenació de les llacunes i dels sistemes costaners del Baix Ter. Institut d'Ecologia Aquàtica - Universitat de Girona, 103.
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Hamilton, D. P., 2014. Model Overview and User Information, General Lake Model, v2.0 β, 1-42.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), 2017. *Vissir3*. Recuperat de: <http://www.icc.cat/vissir3/>
- Illa, E., Puigserver, D., Martí, E., Sierra, J., Barriocanal, C., Quintana, X., Capellà, J., Cruañas, R., Gesti, J., Hereu, B., 2012. Evaluación y diagnosis de los sistemas naturales del Baix Ter, 1-124.
- Menció, A., Casamitjana, x., Mas-Pla, J., Coll, N., Compte, J., Martinoy, M., Pascual, J., Quintana, X.D., 2017, Groundwater dependence of coastal lagoons: The case of La Pletera salt marshes (NE Catalonia). *Journal of Hydrology* 552, 793-806.
- Montaner, J., Quintana, X., Heras, R., Roviras, A., 2010, El flux hidrològic de la plana del Baix Ter, Evolució fluvial, caracterització hidrològica i pautes de gestió. Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis, (ISSN 2013-5939), 236.
- Pascual, J., Martinoy, M., 2017, Proyecto Pletera LIFE 13 NAT/ES/001001, Seguimiento de niveles de agua i salinidad, Informe 2014-2016, Generalitat de Catalunya, 1-48.

The General Lake Model, 2016, Western Australia University. Recuperat de:
<http://aed.see.uwa.edu.au/research/models/GLM/>