Universitat de Girona

Facultat de Ciències

Memòria del Treball Final de Grau

Títol del treball:

Variacions estacionals en la salinitat del subsòl a les basses litorals de nova creació a la Pletera

Estudiant: Guillem Ros Roldan

Grau en Ciències Ambientals

Correu electrònic: Guillemros93@gmail.com

Tutor: David Soler i Hernàndez

Empresa / institució: Universitat de Girona

Vistiplau tutor:

Nom del tutor: David Soler i Hernàndez

Empresa / institució: Universitat de Girona

Correu(s) electrònic(s): david.soler@udg.edu

Data de dipòsit de la memòria a secretaria de coordinació: 25 de Maig del 2017

Resum

La zona estudiada se situa dins els aiguamolls del Baix Empordà, on l'antiga desembocadura del riu Ter, va propiciar la formació d'un sistema lacunar que des del 1992 és considerat Espai d'Interès Natural (EIN). El present documentant, es focalitza a la llacuna de Fra Ramon i L04, amb l'objectiu de caracteritzar les variacions estacionals en la salinitat del subsòl. A partir de dades recopilades trimestralment durant el període comprès entre febrer del 2016 i abril del 2017, s'ha desenvolupat un estudi dels nivells de resistivitats mitjançant tomografia de resistivitats elèctriques que permet determinar els nivells de salinitat del sòl.

El mètode ERT (Electrical resistivity Tomography) ha servit per crear un model 2-D on es pot observar els valors de resistivitat en fondària de manera més observacional i clara podent estudiar la variació dels resultats entre les diferents campanyes, *"Time-lapse"*, ja sigui en % de variació entre campanyes, % acumulat o valors mitjans de resistivitats en fondària. Aquests paràmetres s'han relacionat amb dades externes com per exemple els nivells d'aigua de les llacunes, registres de sondejos i excavacions o valors hidrometereològics i marítims, per determinar la variació temporal de la salinitat i comprovar quin són els valors que afecten en aquesta variació.

Les dades de resistivitats i els valors observats, tant per dades recopilades externament, com les dades calculades al laboratori, demostren una clara variació depenent de les condicions climàtiques i de l'estació de l'any, observant valors més elevats de salinitat en èpoques amb presència de precipitacions i amb l'augment del nivell de les basses i del mar. Aquestes condicions augmentarien la saturació dels materials en la capa superior del perfil. Com s'ha observat també existeix una relació entre la humitat del sòl i la seva salinitat, confirmant el per què augmenta la resistivitat del sòl en èpoques amb molta aportació d'aigua a la zona, fenomen vinculat al balanç entre aigua dolça i salada en cada moment. Mentre que en absència d'aigua i assecament de la capa superior del perfil aportaria augments dels nivells de resistivitat del sòl.

Per altra banda els valors de resistivitat en capes inferiors estan relacionades amb la intrusió d'aigua per part del mar. Amb un augment de l'efecte de l'aigua de mar, els nivells de resistivitat baixen i per tant augmenten els valors de salinitat. Per altra banda, valors de resistivitat elevats, estaran relacionats amb presència d'aigua més dolça.

Resumen

La zona estudiada se sitúa dentro de los humedales del Baix Empordà, donde la antigua desembocadura del Río Ter, propició la formación de un sistema lagunar que desde el 1992 es considerado Espació de Interés Natural (EIN). El presente documentado, se focaliza en la laguna de Fra Ramon y L04, con el objetivo de caracterizar las variaciones estacionales en la salinidad del subsuelo. A partir de los datos recopilados trimestralmente durante el periodo comprendido entre febrero de 2016 y abril de 2017, se han desarrollado un estudio de los niveles de resistividad mediante tomografía de resistividades eléctricas que permiten determinar los niveles de salinidad del suelo.

El método ERT (Electrical resistivity Tomography) ha servido para crear un modelo 2-D donde se puede observar los valores de resistividad en profundidad de manera más observacional y clara pudiendo estudiar las variaciones de los resultados entre las diferentes campañas, *"Time-lapse"*, ya sea en % de variación entre campañas, % acumulado o valores medianos de resistividades en profundidad. Estos parámetros se han relacionado con datos externos como por ejemplo los niveles de agua de las lagunas, registros de sondeos y excavaciones o valores hidrometereológicos y marítimos, para determinar la variación temporal de la salinidad y comprobar cuáles son los valores que afectan en estas variaciones.

Los datos de resistividades y los valores observados, tanto por datos recopilados externamente, como los datos calculados en el laboratorio, demuestran una clara variación dependiendo de las condiciones climáticas y de la estación del año, observando valores más elevados de salinidad en épocas con presencia de precipitaciones y un aumento del nivel de las lagunas y del mar. Estas condiciones aumentarían la saturación de los materiales en la capa superior del perfil. Como se ha observado también, existe una relación entre la humedad del suelo y la salinidad confirmando porqué aumenta la resistividad del suelo en épocas con una alta aportación de agua en la zona, fenómeno vinculado al balance entre agua dulce y salada en cada momento. Mientras que en ausencia de agua y sequedad de la capa superior del perfil aportaría un aumento de los niveles de resistividad del suelo.

Por otra banda los valores de resistividad en capas inferiores están relacionados con la intrusión de agua por parte del mar. Con un aumento del efecto del agua de mar, los niveles de resistividad bajar y por tanto aumentan los valores de salinidad. Por otra banda, valores de resistividad elevados, estarán relacionadas con presencia de agua más dulce.

Abstract

The study area is located within the wetlands of the Baix Empordà, where the old mouth of the River Ter, has led to the formation of a lagoon system that from 1992 is considered an Area of Natural Interest (EIN). The present documented, focuses on the lagoon of Fra Ramon and L04, with the objective of characterizing the seasonal variations in the salinity of the soil. From the data collected seasonally during the period between February 2016 and April 2017, have developed a study of the levels of resistivity electrical resistivity tomography to determine the levels of soil salinity.

The ERT (Electrical Resistivity Tomography) has served to create a 2-D model with the distribution of resistivity values in depth, allowing to study the variations of the results among the different campaigns, "Time-lapse", either in % of variation between campaigns, % accumulated or median values of resistivity in depth. These parameters have been related to external data such as the water levels of the lagoons, records of surveys and excavations, and hydro-meteorological and maritime values to determine the temporal variation of salinity and check what are the values that affect in these variations.

The resistivity data observed, both by data collected externally and the calculated data in the laboratory, show a clear variation linked on weather conditions depending on the season of the year, having regard to the higher values of salinity in times with the presence of precipitation and an increase in the level of the lagoons and the sea. These conditions would increase the saturation of the material on the top layer of the profile. As has also been observed, there is a relationship between soil moisture and salinity, confirming the reason that soil resistivity increases in time with a high contribution of water in the area, considering the balance between fresh and saline water at each particular time. While in the absence of water and drying of the top layer of the profile would be a decrease in the levels of soil resistivity.

On the other band resistivity values in lower layers are related to the intrusion of sea water. With an increase of the effect of the sea water, the levels of resistivity lower and therefore increase the salinity values. On the other band, high resistivity values, will be related to the presence of fresh water.

Índex

1 Introducció.....5

1.1 Àrea d'estudi.....6

1.1.1 Localització i característiques.....6

1.1.2 Climatologia.....7

1.1.3 Geologia i geomorfologia.....7

1.1.4 Hidrologia i hidrogeologia.....8

1.1.5 Antecedents Projecte LIFE Pletera... 9

1.2 Prospecció geofísica elèctrica aplicada a l'estudi de zones humides.....10

2 Objectives.....11

3 Metodologia.....11

3.1 Organització del treball.....11

3.2 Treball de camp.....12

3.2.1 Prospecció geofísica per tomografia de resistivitats elèctriques.....12

3.2.2 Mostreig del sòl.....13

3.2.3 Determinacions in situ.....14

3.3 Anàlisis de laboratori.....14

3.4 Tasques de gabinet.....15

3.4.1 Tractament de les dades geofísiques.....15

3.4.2 Recopilació d'altres dades externes.....15

3.4.3 Relacions entre la resistivitat elèctrica del subsòl i la conductivitat elèctrica de l'aigua de saturació.....16

4 Resultats i discussió.....18

4.1 Model de partida.....18

4.2 Evolució temporal de la resistivitat a la secció estudiada.....20

4.2.1 Canvis observats entre campanyes i valors mitjans per nivells de fondària.....20

4.2.2 Factors inductors de canvis en la salinitat.....22

4.3 Evolució de la humitat i salinitat a la zona no saturada.....24

4.4 Evolució de la salinitat a la zona saturada.....28

4.5 Implicacions ambientals del règim de salinitat a la Pletera.....29

5 Conclusions.....29

6 Bibliografia.....31

1. Introducció

Les llacunes i aiguamolls litorals són el resultat de processos geològics i hidrogeològics que evolucionen ràpidament, i com a confluència d'aigües continentals i marines, constitueixen un dels ecosistemes més fluctuants i productius del món *(Carol et al., 2013; Badosa et al., 2006).* Aquestes llacunes litorals proporcionen serveis ecosistèmics amb una funcionalitat molt important en l'àmbit ecològic, ja que s'encarreguen de mantenir un flux de matèria i energia entre els ecosistemes terrestres i els marins. Tanmateix, la pressió urbanística vinculada al desenvolupament turístic i a l'explotació agrària de les planes al·luvials pròximes, ha propiciat una forta degradació i regressió d'aquests hàbitats. A conseqüència, junt amb l'alteració del funcionament ecològic, la biodiversitat s'ha vist reduïda, limitant els beneficis que l'ecosistema aporta a la societat *(Rovira, 2016).*

A la maresma de la Pletera (Reserva Natural Parcial), emplaçada al municipi de Torroella de Montgrí, hi ha una predominança de substrat salí a causa de la gran interacció que hi ha entre les basses naturals i les basses de nova creació amb el mar. Els valors de salinitat condicionen la vegetació i la fauna aquàtica d'aquests ecosistemes protegits, sent un valor molt important per la seva supervivència. Per tant s'ha relacionat aquests nivells de salinitat amb diferents característiques que fan variar aquests valors. Una característica important és la influència marina a causa de la proximitat amb el mar. L'aigua de mar té alts continguts en sals, per tant una gran influència ajudaria a mantenir els nivells de sal de la zona, ja sigui per aportació d'aigües superficials en temporals o mitjançant intrusions salines subterrànies.

S'ha estudiat la relació dels nivells de salinitat i també la seva variació estacional. L'objectiu d'aquest treball és observar com varien aquests valors en les diferents estacions durant un any, amb una campanya cada tres mesos amb les seves diferents característiques climàtiques, passant pels mesos de l'estiu amb un augment de les temperatures i l'evapotranspiració de la zona, als mesos de la primavera on augmentarà considerablement les precipitacions. Aquest estudi temporal ajudarà a aportar diferents solucions en les diferents èpoques de l'any per evitar situacions de risc que puguin afectar a l'ecosistema.

L'estudi dels nivells de salinitat s'ha dut a terme amb el de mètode de tomografia de resistivitats elèctriques, una tècnica geofísica indueix un corrent elèctric al sòl que interactua amb la seva conductivitat elèctrica donant un valor de resistivitat que recull l'equipament donant diferents valors de resistivitats en fondària en un perfil determinat. Gràcies a la relació de la resistivitat amb la conductivitat elèctrica es pot tenir una imatge de la distribució de la salinitat del sòl.

L'objectiu principal del seguiment realitzat amb aquest projecte és obtenir dades concretes sobre el règim de variació de la salinitat al subsòl i la seva relació amb les aigües superficials, i incorporar-les al sistema de gestió ambiental de l'ecosistema.

1.1 Àrea d'estudi

1.1.1 Localització i delimitació

La zona d'estudi es troba inclosa al sector litoral del terme municipal de Torroella de Montgrí-l'Estartit (Baix Empordà, Girona) (Figura 1). Forma part de la plana del Baix Ter, amb límits geogràfics corresponents a la Serra de Valldevià al NW, al massís del Montgrí al NE, el mar Mediterrani a l'E, el massís de Begur al SE i el Puig Rodó al SW *(Pujol, 2003).*

El sector estudiat es troba a 500 metres de la desembocadura del riu Ter i a 100 metres al N de la Bassa del Fra Ramon (Figura 1). S'ha escollit aquesta localització per aprofitar la interacció de tres zones aquàtiques diferenciades: Una bassa permanent natural (Fra Ramon) una bassa de nova creació (L04) i el mar. El model és perpendicular al mar i paral·lel a les basses per poder observar s'hi ha intercanvi de masses d'aigua entre les dues basses i s'hi ha aportació d'aigua marina subterrània. Per últim, aquesta zona ha estat escollida, ja que és una zona que no es veu afectada per les modificacions topogràfiques que es deuen a terme durant els treballs de modificació morfològica del terreny a causa de la restauració de la zona.

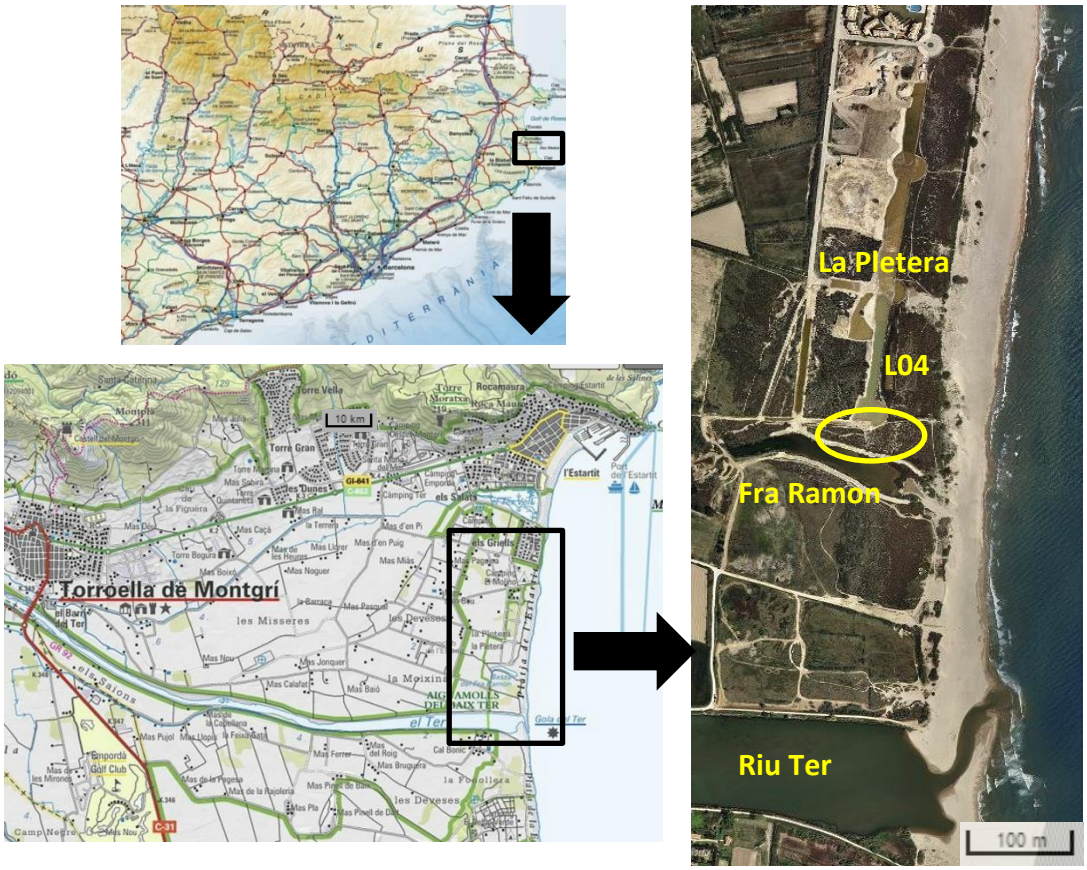


Figura 1: *A) Situació geogràfica dins de Catalunya. B) Zona geogràfica del Municipi de Torroella de Montgrí. C) Àmbit de la Pletera i situació de la zona estudiada. Font: ICGC/Vissir3.*

En aquest estudi s'ha determinat la variació de salinitat al sòl en la zona de la Pletera, just al nord de la Bassa del Fra Ramon, perpendicularment al mar Mediterrani. La Pletera constitueix una banda paral·lela a la línia de costa d'uns 1500 x 250 metres que s'estén des dels Griells fins a la desembocadura del riu Ter. Fins a la dècada dels 80 aquest espai estava íntegrament ocupar per maresmes i llacunes d'aigües salobres. Posteriorment, amb la urbanització d'una part de l'espai, l'àrea de maresma es va reduir notablement i van desaparèixer gran part de les llacunes *(Gesti et al., 2003).*

1.1.2 Climatologia

La zona d'estudi s'inclou en una regió de clima mediterrani xerotèric marítim, caracteritzat per temperatures suaus, per la presència d'un període àrid estival de 2-3 mesos i per una distribució irregular de la precipitació amb màxims primaveral i tardoral. L'Estartit presenta una temperatura mitjana anual d'uns 15 ºC, essent els mesos de juliol i agost els més càlids (22,8 i 22,9 ºC de mitjana respectivament) i febrer el més fred (8,8 ºC de mitjana) *(Gesti et al., 2003).*

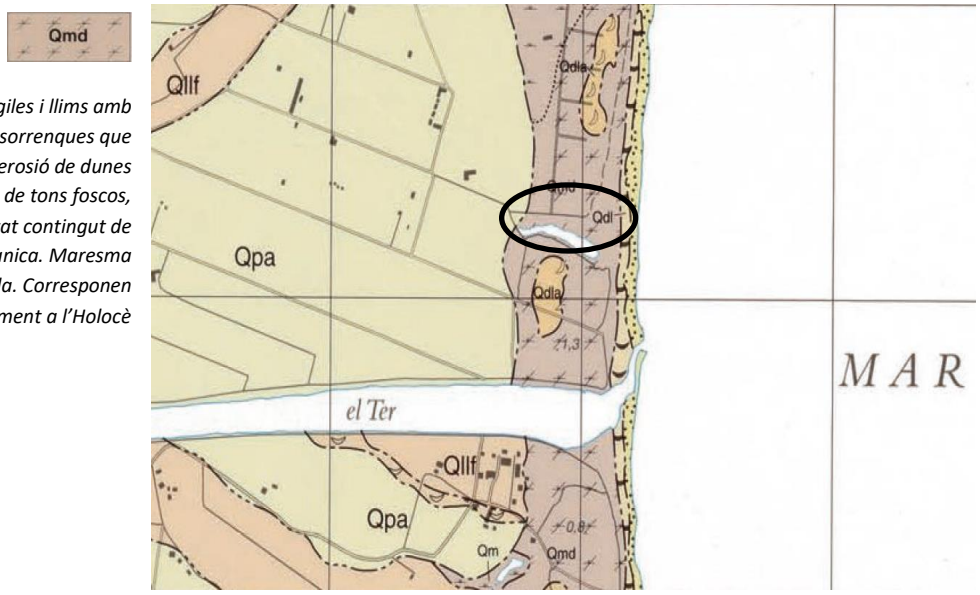
Pel que fa a les precipitacions, la mitjana anual es troba entorn dels 600 mm, essent el mes d'octubre el més plujós (amb 96,6 mm de mitjana) i juliol el més àrid (21,2 mm). Els vents dominants són de component nord (tramuntana), en especial durant els mesos hivernals. També el garbí (S) i el llevant (E), aquest darrer d'especial rellevància per la seva relació amb els temporals marins que provoquen la inundació de les àrees de maresma.

1.1.3 Geologia i geomorfologia

La zona d'estudi s'inscriu en la unitat morfo estructural de la Depressió de l'Empordà, i més concretament a la del Baix Empordà, delimitada pels massissos del Montgrí i de Begur (Figura 2).

Tota l'àrea inclosa en aquest pla de gestió presenta, en superfície, materials quaternaris (Holocè) dipositats com a conseqüència de la interacció dels processos fluvials (sediments aportats pel riu Ter) i marins que han donat lloc a la formació de la plana litoral. Es tracta principalment de sorres (a les platges i dunes), graves, sorres i llims (a la plana al·luvial) i lutites amb matèria orgànica (en àrees de maresma o aiguamolls) *(Montaner et al., 2010).*

El substrat geològic de l'àrea final de la plana del Baix Ter, es troba recobert per dipòsits al·luvials i fluvi-deltaics, els quals se'ls hi atribueix una edat del plistocè superior – holocè *(Hereu et al., 2012).* A escala local, la unitat està formada per sorres eòliques sobre les quals es detecten llims amb abundant matèria orgànica i que poden ser recobertes per sediments sorrencs i llimosos, corresponents a la plana d'inundació. La zona d'estudi està situada aproximadament a 1 m sobre el nivell del mar i el pendent és pràcticament nul.



Qmd: Argiles i llims amb intercalacions sorrenques que provenen de l'erosió de dunes litorals. Són de tons foscos, amb elevat contingut de matèria orgànica. Maresma degradada. Corresponen cronològicament a l'Holocè

Figura 2: *Mapa de les unitats geològiques quaternàries del litoral del Baix Ter, amb indicació de la zona estudiada (extret del mapa geològic 1:25000, ICC,1995).*

1.1.4 Hidrologia i hidrogeologia

Actualment, aquesta maresma constitueix una zona de transició entre el mar Mediterrani i les terres influenciades pel riu Ter, essent els processos de mescla costaners, el que en gran part, determinen les característiques mediambientals de la badia *(Carol et al., 2009).*

La hidrologia de la plana al·luvial va ser modificada els anys 70, a causa de la canalització del riu Ter i els dics construïts a diversos punts de la maresma. Posteriorment, la parcial urbanització en va modificar el paisatge i en va canviar el règim d'aigua natural, provocant la desaparició de diverses llacunes i aiguamolls, fent que actualment només en romanguin 2, una de les quals, la bassa de Fra Ramon.

La plana pertany al tram baix de la conca hidrogràfica del Ter, on existeix una xarxa de canals de reg i drenatge, i dos sistemes lacunars, el Ter Vell i la Pletera *(Gesti et al.,2005)*. El darrer constitueix una àrea de maresma halòfila i fins ara, s'ha considerat que té una relació molt directe amb el mar. Tanmateix, al subsòl es manifesten dues unitats diferenciades de materials geològics, les quals constitueixen dos aqüífers de comportament divers. La unitat superficial està formada per seqüències sedimentàries, donant lloc a un aqüífer superficial lliure, amb un nivell freàtic molt proper a la cota topogràfica, que fins i tot aflora a les llacunes de la Pletera. L'aqüífer profund en canvi, presenta un caràcter confinat-semi confinat, desconnectat del sistema lacunar. A escala local, l'aqüífer superficial és el responsable de les relacions entre les aigües superficials i les subterrànies, segons la gradació decreixent de la permeabilitat des dels nivells més profunds amb graves i sorres, fins als més superficials, dominats per litologia sorrenca i llimosa.

L'aqüífer lliure consta d'uns 15-20 m de gruix, el gradient hidràulic que presenta és de l'ordre de 10-3, el coeficient d'emmagatzematge és d'un 15-20% i els valors de la transmissivitat oscil·len de 2500 a 11000 m2/d *(ACA, 2004).* Presenta una permeabilitat reduïda d'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. Aquest és el cas de Fra Ramon, on segons l'època de l'any, al fons s'observa una capa formada per llims i argiles que dificulta la connexió entre l'aigua superficial i la subterrània, sobretot en períodes en què el nivell piezomètric descendeix i per tant la llacuna hauria d'actuar com a sistema influent *(Hereu et al,. 2012).*

El riu Ter en el curs baix, rep fortes influències dels seus afluents amb règim de crescudes concentrades a la primavera i tardor, coincidint amb períodes de precipitacions. Es considera que té un règim de cabal intermedi amb un cabal mitjà anual de 840 hm3 i mitjana de descàrrega al Mediterrani de 27 m3/s. La desembocadura actual se situa a la platja de Pals, a prop del paratge de la Fonollera de Torroella de Montgrí.

1.1.5 Antecedents Projecte LIFE Pletera

Anterior a aquest estudi, s'han realitzat dos projectes de restauració a la Pletera. El primer projecte datat en el període de 1999-2003 s'anomenava "Projecte Life Ter Vell – Pletera", el qual tenia com a objectiu garantir que els processos característics d'aquest ambients costaners, tant hidrològics de circulació i distribució d'aigua, geomorfològics de transport i acumulació de materials, com ecològics d'interaccions entre les espècies i el seu hàbitat, tinguin lloc de manera natural, sense cap limitació causada per cap tipus de construcció o activitat humana *(Gesti et al.,2005)*.

Per altra banda, el segon projecte datat en el període del 2014-2018 (encara en curs) s'anomena "Projecte Life Pletera", el qual té com a objectiu la restauració integral i definitiva del sistema de llacunes costaneres de la Pletera, amb la fi de recuperar la seva funcionalitat ecològica (*Geoservei, 2016).*

El nostre projecte ajuda aportant informació del seguiment de la restauració d'aquest espai aquàtic protegit analitzant la variació de la salinitat de manera trimestral. Amb algunes aportacions dels projectes anteriors nomenats, ajudarà a una millor comprensió de la zona i aconseguir donar explicacions reals de les variacions de salinitat trimestrals observades en les tomografies de resistivitats elèctriques.

1.2 Prospecció Geofísica elèctrica aplicada a l'estudi de zones humides

La prospecció geofísica intenta distingir o reconèixer les formacions geològiques que es troben en el subsòl mitjançant paràmetres físics. Existeixen diverses tècniques geofísiques elèctriques o electromagnètiques que mesuren la resistivitat dels materials, o en algun cas l'invers, la conductivitat *(Brunet et al., 2010).* En aquest estudi s'ha aplicat la tomografia de resistivitats elèctriques.

La tomografia de resistivitats elèctriques és un mètode basat en la modelització 2-D de la resistivitat del terreny mitjançant l'ús de tècniques numèriques. L'objectiu d'utilitzar la tomografia elèctrica en aquest estudi és obtenir una secció 2-D de resistivitats reals del subsòl, model del qual podrem determinar els nivells de salinitat i la presencia o no de filtracions d'aigua en profunditats, mitjançant la localització d'àrees on tinguem una disminució anòmala del valor de la resistivitat del terreny.

Mesurant la diferencia de potencial elèctric induït per un corrent elèctric que passa a través d'un material, es pot calcular la resistivitat d'aquest material. Les variacions en el comportament geoèlectric fan possible obtenir aquests perfils 2D (Figura 3). Com ens trobem en una zona amb nivells de salinitat molt variable i elevat, una tècnica que mesura les variacions de resistivitats i les conductivitats dels materials del sòl, és la més adequada per aconseguir resultats interessant i útils. A part, aquesta tècnica constitueix una de les més eficaces no destructives dels instruments disponibles per estudiar i caracteritzar les discontinuïtats del subsòl *(Martínez et al., 2009).*

Les tomografies s'han realitzat de manera trimestral per obtenir diferents resultats en un espai determinat de temps per poder analitzar la variació de les resistivitats. Una recopilació de dades dintre d'un espai temporal per comparar-les posteriorment també és conegut pel terme *"Time-Lapse".* Gràcies a aquesta tècnica s'han obtingut diferents dades rellevants i uns resultats interessants en la seva comparació final.

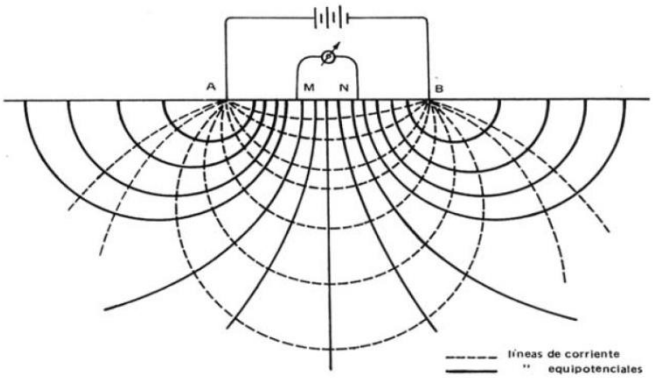


Figura 3: *Esquema bàsic dels mètodes de resistivitat Font: UpCommons, UPC.*

Aquesta prospecció s'ha realitzat de manera perpendicular al mar, entre dues basses, per poder observar si hi ha intercanvis d'aigua entre les basses en èpoques amb temporals, i també per observar s'hi ha intrusió salina per part de l'aigua de mar en la zona est de l'estació de mesura.

2 Objectives

The aim of this work is to characterize, from the point of view of geoelectric properties, the distribution and geometry of sedimentary materials in the area of the restored lagoons of la Pletera and Fra Ramon (l'Estartit, Baix Empordà), the position of surface and groundwater levels, and the salinity of both the water and the soil. By quarterly measurement of an electrical resistivitiy tomography (ERT) profile, it is intended to: i) assess the seasonal oscillations of the levels of underground water that feed the existing and newly created lagoons, ii) to evaluate the influence exerted both by the seawater entrance through the surface and underground, and the influence of evaporation and precipitation processes on the variations of salinity in these protected wetlands. The analysis of these results will be based on the relationship between resistivity and water levels in the lagoons, the subsoil and the sea, considering the influence of precipitation and storms.

The key objectives of the project are the following:

· To determine the resistivity values of the Pletera subsoil on a seasonal basis.

· To calculate the values of salinity by means of samples extracted from the soil and to compare the results of the soil samples extracted with the results of the ERT.

·To determine the relationship between the resistivity and soil moisture in the unsaturated zone, and detect the depth in which is found the presence of seawater over the studied period.

· To explain these variations and contextualize them in the area of the Pletera for a better environmental monitoring and assessment of the area.

3.Metodologia

3.1 Organització del treball

En el marc d'aquest treball, s'han realitzat un seguit de campanyes trimestrals, iniciades al febrer del 2016 i finalitzades a l'abril del 2017. Per aquest projecte s'han analitzat sis campanyes (Taula 1).

Taula 1: *Resum de les sis campanyes i les mostres extretes.*

Campanya	Data	Perfil ERT	Mostres sòl
C-1	11/02/16	ERT-1	0
C-2	14/04/16	ERT-2	6
C-3	13/07/16	ERT-3	2
C-4	21/10/16	ERT-4	6
C-5	10/02/17	ERT-5	6
C-6	28/04/17	ERT-6	6

En cada campanya s'han realitzat diferents tasques. Primer s'ha instal·lat l'equip de mesura i s'han obtingut les dades de resistivitats del subsòl (perfil ERT). Tot seguit, s'han obtingut diferents mostres del sòl per un posterior anàlisi al laboratori. Per últim s'han mesurat diferents característiques de la zona com els nivells de les basses, la topografia del perfil i la conductivitat elèctrica de l'aigua superficial de les basses i subterrània dels punts de mostreig. A part també s'ha realitzat una tasca de documentació sobre les característiques del subsòl de la zona (estudis geològics i geotècnics) i recopilació de dades externes (meteorològiques, nivells d'aigua, nivell del mar) (Figura 4).

Figura 4: *Imatge aèria de la zona d'estudi amb el perfil ERT realitzat (línia groga), els punts de mostreig del sòl (punts vermells), els punts on s'ha determinat el nivell d'aigua i la conductivitat elèctrica de les llacunes (punts blaus), i la posició de les excavacions de reconeixement del terreny practicades en estudis geològics previs. Font: (Geoservei, 2000 i 2016; Zamorano i Soler, 2004).*

3.2 Treball de camp

3.2.1 Prospecció geofísica per tomografia de resistivitats elèctriques

L'equip necessari per a l'execució d'aquest mètode consta de: elèctrodes, cablejat, connectors, unitat central (resistivímetre SAS1000 i selector de canals ES-64C), tot alimentat amb una bateria estàndard. El dispositiu de mesura instal·lat al terreny per fer la tomografia elèctrica (Figura 5) ha consistit en quatre bobines de cablejat disposades en sèrie, i connectades al terra mitjançant elèctrodes d'acer galvanitzat. Els elèctrodes s'han espaiat regularment 1,5 m en el cas dels dos cables centrals, i 3 m en els dels extrems, totalitzant 61 elèctrodes i 120 m de longitud del perfil. La unitat central és l'encarregada d'executar de forma automatitzada la seqüència de mesures predeterminada, verificar el bon estat de les connexions, així com emmagatzemar digitalment tots els resultats.

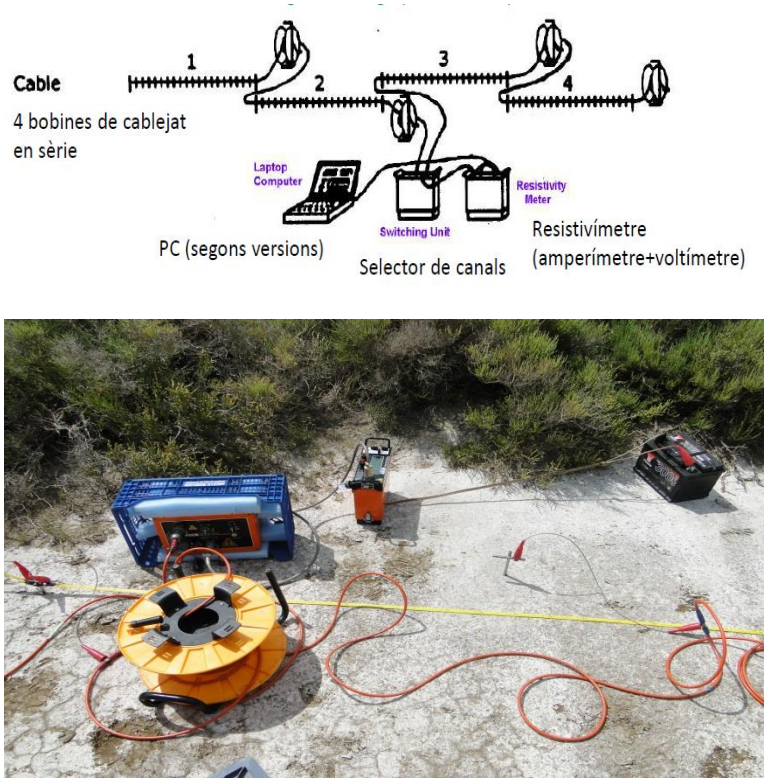


Figura 5: *Esquema del dispositiu de mesura elèctrica (Loke, 2014) i equip muntat sobre el terreny.*

Tant la geometria del perfil com la posició dels elèctrodes ha estat la mateixa en cada campanya, per la qual cosa s'han instal·lat de manera permanent una sèrie de punts de referència fixos. Això ha permès una equivalència exacta entre la posició de les mesures realitzades i ha garantit una bona correlació dels resultats obtinguts.

3.2.2 Mostreig del sòl

Durant les campanyes s'han realitzat diferents extraccions de mostres de sòl per a una determinació al laboratori, mitjançant un tub mostrejador manual de tipus auger. Les extraccions s'han realitzat a les coordenades: X=-29,6 m; X=+0,4 m i X=+30,4 m (Figura 4). Aquestes localitzacions han estat escollides perquè coincideixen exactament amb la posició de valors de resistivitat elèctrica del perfil de tomografia.

S'han extret 2 mostres a cada coordenada. La primera extracció abasta els 30 primers centímetres del sòl i la segona extracció arriba fins als 60 centímetres, de tal manera que es consideren representatives de les fondàries 0,15 m i 0,45 m respecte la superfície del terreny. Les mostres extretes s'han dipositat en bosses de plàstic tancades hermèticament per mantenir la humitat natural de la mostra amb l'ajuda d'espàtules metàl·liques, etiquetades amb la coordenada i la profunditat.

3.2.3 Determinacions in situ

Durant les diferents campanyes, s'han determinat la temperatura (ºC) i la conductivitat elèctrica (mS/cm) de l'aigua a les basses de Fra Ramon i L04, així com en les perforacions realitzades si és que s'hi ha detectat aigua subterrània.

La cota topogràfica relativa dels nivells d'aigua de les basses de Fra Ramon i L04 s'ha obtingut respecte la posició de l'estació de mesura mitjançant un nivell làser Bosch GLL 2-50 Professional (635nm), seguint la metodologia topogràfica habitual *(Carpio, 2001).* Posteriorment, aquestes cotes s'han referit a la posició absoluta en metres sobre el nivell del mar d'acord amb la cartografia topogràfica oficial de projecte LIFE.

3.3 Anàlisis de laboratori

Les característiques determinades al laboratori han sigut la humitat, la granulometria i la salinitat del sòl.

La humitat gravimètrica del sòl s'ha determinat pesant les mostres inicials, posteriorment s'han assecat a una estufa durant 24 hores, a 60 ºC, i finalment s'han pesat les mostres seques. Per obtenir el valor final d'humitat s'ha restat el valor de la mostra seca al valor de la mostra inicial. La humitat s'expressa com a percentatge d'aigua en pes:

$$Humitat = \frac{Mostra\ humida - Mostra\ seca}{Mostra\ seca}$$

La salinitat del sòl s'ha obtingut realitzant una sèrie de dilucions de les mostres de sòl amb aigua destil·lada. En cada dilució s'ha determinat la conductivitat amb un conductímetre de camp i s'ha realitzat un gràfic amb els paràmetres resultats. Una vegada obtingut el gràfic, s'extreu la fórmula de la línia de tendència. Amb el valor de la ordenada en origen de l'equació, s'obté la salinitat de la mostra seca.

Per últim, també s'ha realitzat un anàlisi granulomètric. Per realitzar una classificació granulomètrica, es necessita una columna de tamisos dipositada sobre una columna que realitza vibracions i moviments rotatoris intensos. Les mostres s'han de pesar i posteriorment s'han de dipositar a la part superior de la columna de tamisos. Les mostres, sotmeses a les vibracions, traspassen els diferents tamisos originant un gradient de materials diferenciats per la seva mida. Cada material s'ha pesat individualment segons el seu diàmetre i s'ha realitzat una taula determinant cada fracció granulomètrica com a percentatge en pes retingut per cada tamís.

3.4 Tasques de gabinet

3.4.1 Tractament de les dades geofísiques

L'objectiu d'aquest mètode es basa en l'obtenció d'una secció 2-D de resistivitats reals del subsòl, el model final resultat de la inversió és un arxiu de punts de la secció final, que conté coordenades X i profunditat, així com resistivitat calculada. A partir d'aquí s'ha fet l'anàlisi *time-lapse*, és a dir, s'han estudiat les variacions dels resultats obtinguts entre les diferents campanyes.

Inversió de dades i obtenció dels perfils de resistivitat

Per aconseguir-ho, s'ha utilitzat el programa d'inversió de dades *Res2DInv* de Geotomo Software. Aquest programa permet transformar les resistivitats aparents obtingudes de la campanya de camp, a valors de resistivitats reals *(Loke et al, 2003).* S'ha fet una inversió preliminar per descartar punts anòmals, establint un llindar d'error residual (entre 26 i 34%), cosa que ha deixat en cada campanya entre el 96,5 i el 100% dels punts mesurats. Una segona inversió final, amb entre 2 i 4 iteracions, per a una secció final de 4530 punts calculats, i una fondària màxima d'investigació de 13,1 m. Els errors quadràtics mitjans de les seccions de resistivitat són baixos, compresos entre 2,5 i 4,8%, fet que denota la bona concordança entre els models calculats i les dades mesurades. Com a resultat final s'obté un model que mostra la distribució de la resistivitat al llarg de la secció estudiada.

Determinació de les variacions temporals de resistivitat

S'han quantificat individualment els canvis de resistivitats enregistrats en tots els punts del model calculat (una vegada s'ha realitzat la inversió). S'ha realitzat una comparació quantitativa de tots els resultats obtinguts entre les diferents campanyes realitzades en aquest projecte.

S'observa que hi ha variacions en sentit positiu i negatiu. Les diferències positives fan referència a un augment de les resistivitats, que es pot atribuir a una reducció del contingut en aigua en la zona no saturada del perfil i presència d'aigua més dolça (amb menys quantitat de sal) a la zona saturada. Per altra banda, les diferències negatives de les resistivitats indiquen un augment de la humitat a la zona no saturada i més contingut d'aigua salina a la zona saturada.

3.4.2 Recopilació d'altres dades externes

A l'hora de determinar el perquè de les variacions de la salinitat del sòl, s'han obtingut diferents dades externes per poder recolzar les explicacions i hipòtesis redactades en aquest projecte.

Hidrometeorològiques i marítimes

Les dades hidrometeorològiques i marítimes que s'han obtingut per observar s'hi ha una pertorbació de la salinitat en l'aportació d'aigua superficial per les precipitacions o l'aigua de mar en grans temporals són la precipitació i la temperatura mitjana diària, el nivell del mar

mínim i màxim diari, i altura de les onades. Les dades hidrometeorològiques s'han obtingut en la plataforma "*Ruralcat*", procedents de l'estació de Torroella de Montgrí. Les dades marítimes s'han obtingut dels meteogrames mensuals que es publiquen a la web meteolestartit.cat (disponibles només de gener 2016 a gener 2017).

Nivells d'aigua a les llacunes

S'han obtingut els nivells d'aigua a les llacunes (Fra Ramon i L04) per poder observar s'hi ha una relació amb l'augment o la disminució del nivell de l'aigua amb la variació de la salinitat superficial del sòl o l'aportació d'aigua subterrània a l'aqüífer del perfil de mesura. També s'ha comptat amb les dades de seguiment s'efectua el Servei de Control de Mosquits de la Badia de Roses i el Baix Ter.

Conductivitat elèctrica (llacunes i mar)

S'han obtingut els valors de conductivitat elèctrica de les dues llacunes circumdants (Fra Ramon i L04) i del mar. Aquestes dades s'han relacionat amb els valors de conductivitat calculada del sòl i de l'aigua subterrània per observar s'hi ha una relació intrínseca entre les conductivitats de les llacunes amb les conductivitats superficials per observar s'hi ha una aportació directa d'aigua de les llacunes o s'hi ha una aportació subterrània d'aigua de mar augmentant els nivells de salinitat per intrusió salina. Les dades s'han obtingut del seguiment que realitza la Dra. A. Menció en el marc del projecte LIFE Pletera 2014-2018.

Registres de sondejos i excavacions

S'han obtingut diferents registres de sondejos i excavacions per observar la composició dels materials del subsòl amb més exactitud per poder comparar els valors de resistivitat amb les diferents capes de materials que la formen. Aquest model s'ha comparat amb un model geològic de la zona d'estudi per relacionar les variacions de resistivitats amb els diferents elements geològics que formen el subsòl. La finalitat d'aquesta relació és observar quins elements geològics pateixen més canvis de resistivitats reals, fet que es podria relacionar amb la separació de la zona freàtica, determinar composició granulomètrica dels elements i la seva porositat *(Benjamin et al, 2008).* Les dades s'han obtingut dels següents treballs: *(Geoservei, 2000 i 2016; Zamorano i Soler, 2004).*

3.4.3 Relacions entre la resistivitat elèctrica del subsòl i la conductivitat elèctrica de l'aigua de saturació.

S'ha determinat la relació entre la resistivitat elèctrica i la conductivitat elèctrica de l'aigua de saturació. Pel que fa a la zona no saturada, s'ha relacionat la humitat gravimètrica de les mostres de sòl i la seva salinitat amb els valors de resistivitat elèctrica calculats (ERT). La finalitat és, observar s'hi ha una relació entre la variació de la resistivitat amb els valors d'humitat per tal de poder tenir una determinació de la humitat al llarg de la zona més superficial del perfil, a profunditats de 15 i 45 cm, basant-nos en les mesures de resistivitats efectuades amb l'ERT.

En el cas de la zona no saturada, el grau de saturació s'ha estimat a partir de la humitat gravimètrica determinada al laboratori. El grau de saturació (S_w) d'un material depèn de la seva porositat (ϕ) i el contingut volumètric d'aigua en cada moment (humitat volumètrica, θ) segons la relació:

$$\theta = \phi S_w$$

La humitat volumètrica s'ha determinat a partir de la humita gravimètrica (u) mitjançant:

$$\theta = u \cdot Gs$$

On Gs és la gravetat específica del material, que s'obté:

$$Gs = \gamma_s / \gamma_w$$

γ_s és la densitat de les partícules sòlides (en el cas de les sorres de quars és 2,65 g/cm^3), i γ_w és la densitat de l'aigua destil·lada a 4 ºC (1g/cm^3).

Per aprofundir més en el tema, a la bibliografia especialitzada és conegut que existeix una relació de tipus polinòmic entre el grau d'humitat d'un sòl en la zona no saturada, i la seva resistivitat. Aquesta relació és bastant complexa, ja que depèn en grau mesura de la porositat del material i el grau de saturació, per tant no s'ha entrat tant en matèria en aquest apartat *(Friedman, 2005; Khalil, 2009).*

Pel que fa a la zona saturada s'ha determinat la relació entre la resistivitat elèctrica i la conductivitat elèctrica de l'aigua de saturació. Els valors de conductivitat elèctrica s'han calculat amb la Llei d'Archie a diferents fondàries. La Llei d'Archie és la següent:

$$Fi = \frac{Ro}{Rw} = a\Phi^{-m}Sw^{-n}$$

Ro és la resistivitat de formació, Rw és la resistivitat de l'aigua als porus, Φ és la porositat la qual s'obté de les característiques granulomètriques dels materials determinats al laboratori, Sw és la saturació d'aigua, a i m són els constats relacionades amb el tipus de roca i per últim n és l'índex de saturació. En el nostre cas com ens trobem amb materials sorrencs no consolidats i sense proporció apreciable de fins seran a=1 i m=1,5 l'índex de saturació és n=2 *(Khalil et al., 2009).* La zona saturada serà S_w=1, els càlculs s'han basat en una estimació de la porositat a diferents fondàries, basant-se en valors característics obtinguts a *(Friedman, 2005).* La llei d'Archie es considera vàlida en medis saturats sense presència apreciable de fracció granulomètrica fina, però falla en medis parcialment saturats, o amb fracció argilosa abundant, o amb aigües molt poc conductives. En el nostre cas, no hi ha presència de materials fins en les mostres investigades, per això s'ha aplicat.

La finalitat és determinar la conductivitat elèctrica de l'aigua de saturació al llarg del perfil ERT, per detectar la fondària a partir de la qual hi ha presència d'aigua marina (falca salina), i en quines hi hauria mescla amb les aigües meteòriques procedents de la superfície, menys salines.

4. Resultats i discussió

4.1 Model de partida

Una vegada tractades les dades de les tomografies elèctriques s'han obtingut un seguit de perfils tomogràfics amb els diferents rangs de resistivitat en fondària (Figura 6). La primera campanya l'hem considerat com la secció de referència i el punt de partida del sistema d'estudi.

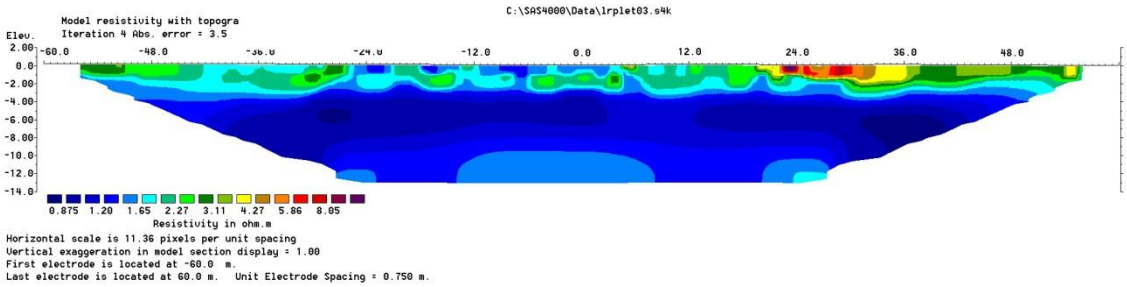


Figura 6: *Secció tomogràfica de resistivitats elèctrica de la campanya 1 (Campanya referència)*

De l'anàlisi de la secció es pot establir un model geofísic en tres capes diferenciades en funció de la distribució de les resistivitats elèctriques:

·La primera capa conté valors intermedis de resistivitats calculades (0,5-3 ohm·m) i està compresa fins a fondàries de -1 a -1,5 metres entre les coordenades X -60 i al voltant de 20 m. Entre les coordenades 20 i 60 m s'han observat com hi han valors més elevats. Aquesta diferència de resistivitats tenen dues explicacions: o bé els materials que formen aquesta secció són diferents, o bé té un gruix molt reduït que no es detecta amb la resolució de la secció.

·La segona capa conté valors de resistivitats calculades més elevats, tot i ser baixos, que la capa superior (1-4 ohm·m) i es troba per sota de la primera fins a unes cotes al voltat de -3 metres. Com en el cas anterior s'observen valors més elevats entre les coordenades X 20 a 60 m (2-10 ohm·m).

·Per últim, s'observa una tercera capa des de la cota -3 fins a almenys a la cota -14 m amb resistivitats calculades molt baixes (<0,5-2 ohm·m) en què els valors mínims es troben, aproximadament, entre els -4 i -8 m de cota.

Per atribuït la composició d'aquestes 3 unitats de materials, s'han obtingut dades d'acord amb les excavacions i sondejos què disposem *(Geoservei, 2000; Zamorano i Soler, 2004)*. Com es pot observar a la figura 7, hi ha una relació entre les diferents capes de resistivitats amb les materials que formen aquest perfil. La capa superior està formada per sorres marronoses de gra fi-mitjà, entre 0,5 i 1 m de gruix. Gràcies a la granulometria realitzada en aquest projecte, s'ha destacat que són sorres molt uniformes gairebé sense fracció fina. La segona capa està formada per llims argilosos de color gris i fangs negres (maresma antiga) amb gruixos entre 0,2 i 0,8 m. Com s'ha observat als diferents sondejos el nivell no és continu amb una variació dels

gruixos d'aquest material, a part, també s'ha detectat amb el sondeig manual que es va realitzar a l'última campanya, corroborant la naturalesa d'aquests materials.

Per últim, la tercera capa observada està formada per sorres grises i marró de gra gros, amb matriu de gra fi-mitjà (eòlic duna-platja) en els primers 3 m, on per sota es degraden a sorres de gra molt fi a fi, de color gris (avantplaja), almenys fins als -16 m, les quals corresponen a sediments de platja amb retreballament eòlic a dalt, i d'avantplatja cap avall.

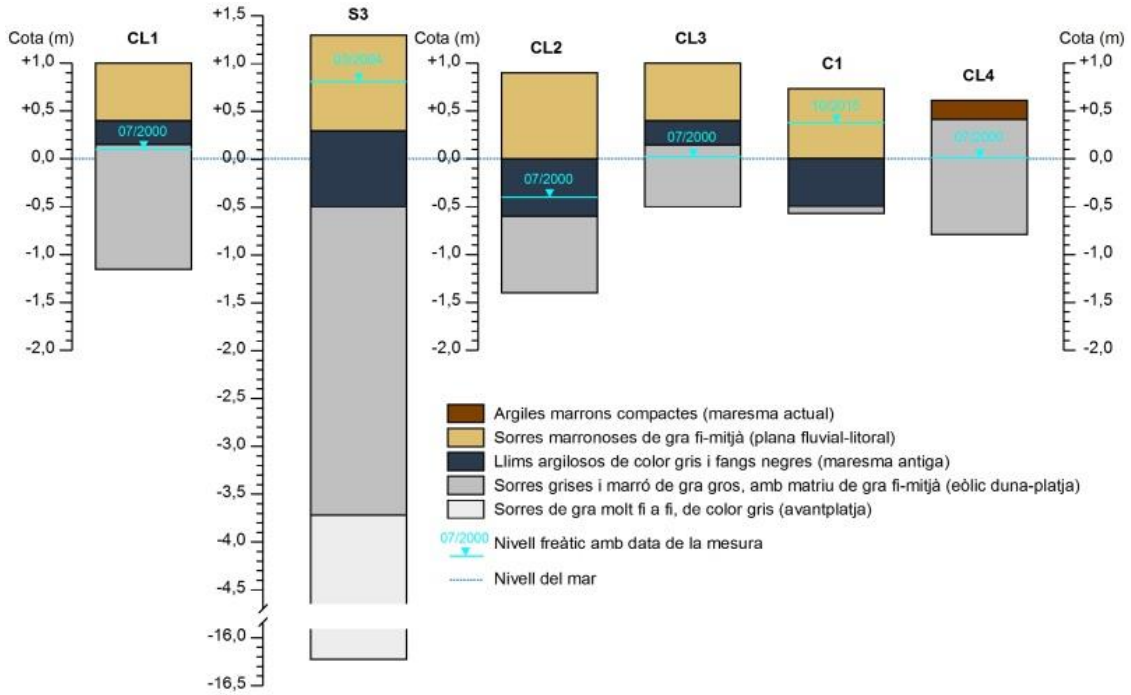


Figura 7: *Sondejos i excavacions de la zona estudiada Font: (Geoservei, 2000) i (Zamorano i Soler, 2004).*

Una vegada s'han observat les composicions determinades als sondejos, s'han atribuït a la primera unitat de resistivitats a les sorres, llims i fangs negres (U1), la unitat intermèdia a la part superior de les sorres mitjanes i grosses (U2) i per últim a la tercera capa a les sorres molt fines de sota (U3).

La posició del nivell freàtic, s'ha determinat observat les dades de nivells de les llacunes i sondejos. El nivell freàtic s'ha trobat proper a la cota 0, amb diferents oscil·lacions uns pocs decímetres. S'ha considerat que la zona no saturada es trobarà habitualment només en les sorres de la unitat superior, mentre que els nivells de llims-fangs negres estarien permanentment saturats. Aquests materials tenen una permeabilitat baixa, i per tant localment poden actuar com a base per al manteniment de la làmina d'aigua per sobre dels materials *(Geoservei,2016)*. Per sota, l'alta permeabilitat de les sorres que connecten directament amb el mar, són la formació per on s'ha produït l'entrada d'aigua marina, concordant amb la presència de resistivitats més baixes observades en els materials que hi ha per sota la cota –3 i -4 a les seccions geolèctriques.

4.2 Evolució temporal de la resistivitat a la secció estudiada

En aquest apartat s'ha estudiat l'evolució temporal de la resistivitat a la secció estudiada. L'objectiu és observar quina variació s'observa i el perquè d'aquesta variació. També s'observen els valors acumulats des de la primera campanya fins a l'última i la variació en % de la resistivitat en fondària.

4.2.1 Canvis observats entre campanyes a la secció estudiada i valors mitjans per nivells de fondària

S'han representat les variacions de resistivitats calculades amb la tomografia (en % de variació) en un seguit de models de colors per observar més clarament com varien les resistivitats al llarg del perfil i en fondària (Figura 8).

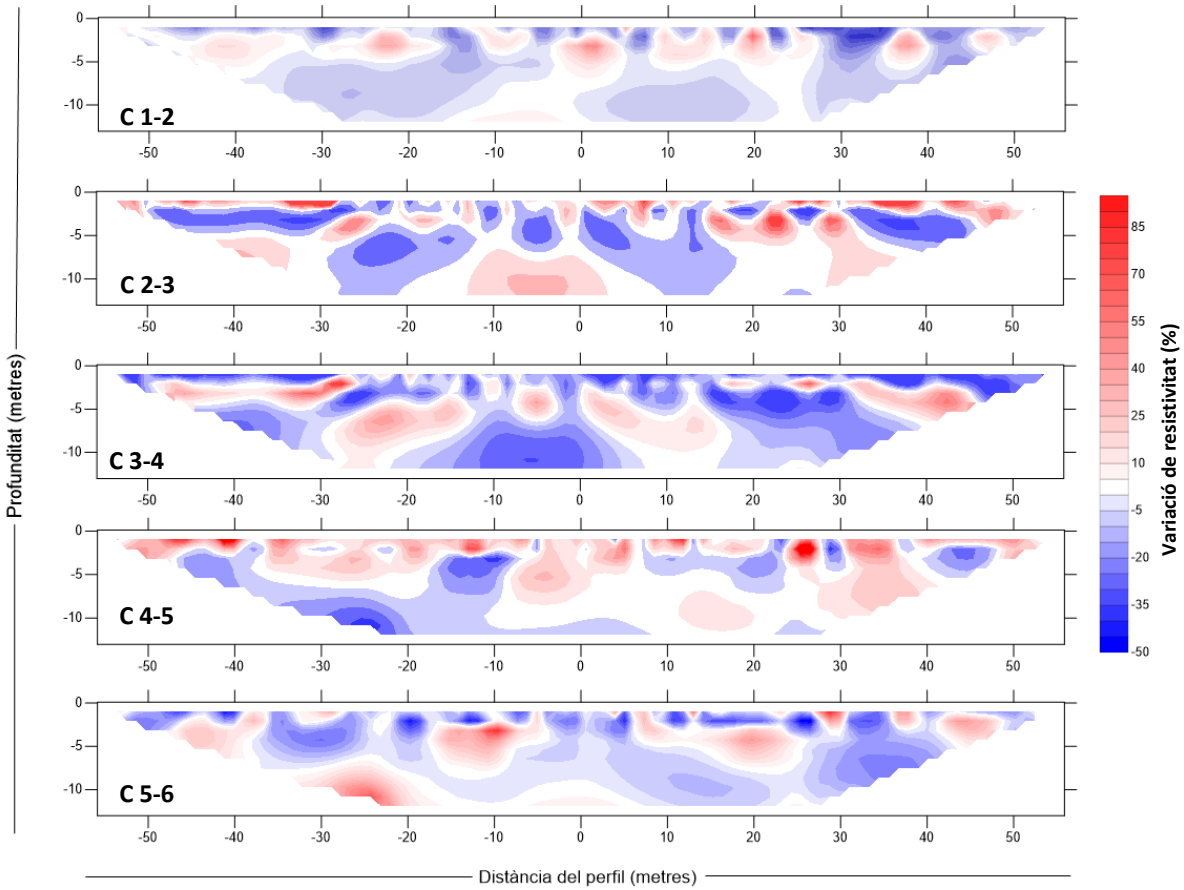


Figura 8 *Seccions amb les variacions temporals de les resistivitats (%) entre campanyes consecutives.*

-Diferència entre campanyes 1 i 2: Com es pot observar en la figura 8 hi ha un descens de la resistivitat en les dues capes més superficial U1 i U2 del perfil. Aquest descens pot estar ocasionat per un possible increment de la saturació. Per altra banda s'observa un increment de la resistivitat en capes més inferiors (U3), les quals estan formades per sorres molt fines. Aquest augment pot ser degut a un augment de l'aigua menys conductiva, més "dolça", plausiblement procedent de les precipitacions.

-Diferència entre campanyes 2 i 3: S'observa un augment de les resistivitats en les dues capes superiors del perfil. Aquest augment és possible degut a l'augment de l'evapotranspiració i

assecament de la zona no saturada. Per altra banda, a la capa més profunda (U3), hi ha una alternança entre augments i descens de resistivitat (Figura 9). Aquesta variació en una mateixa capa és degut a una possible intrusió salina en algun sector del perfil disminuït la resistivitat i una presència d'aigua menys conductiva procedent, possiblement, de les precipitacions amb un augment de la resistivitat.

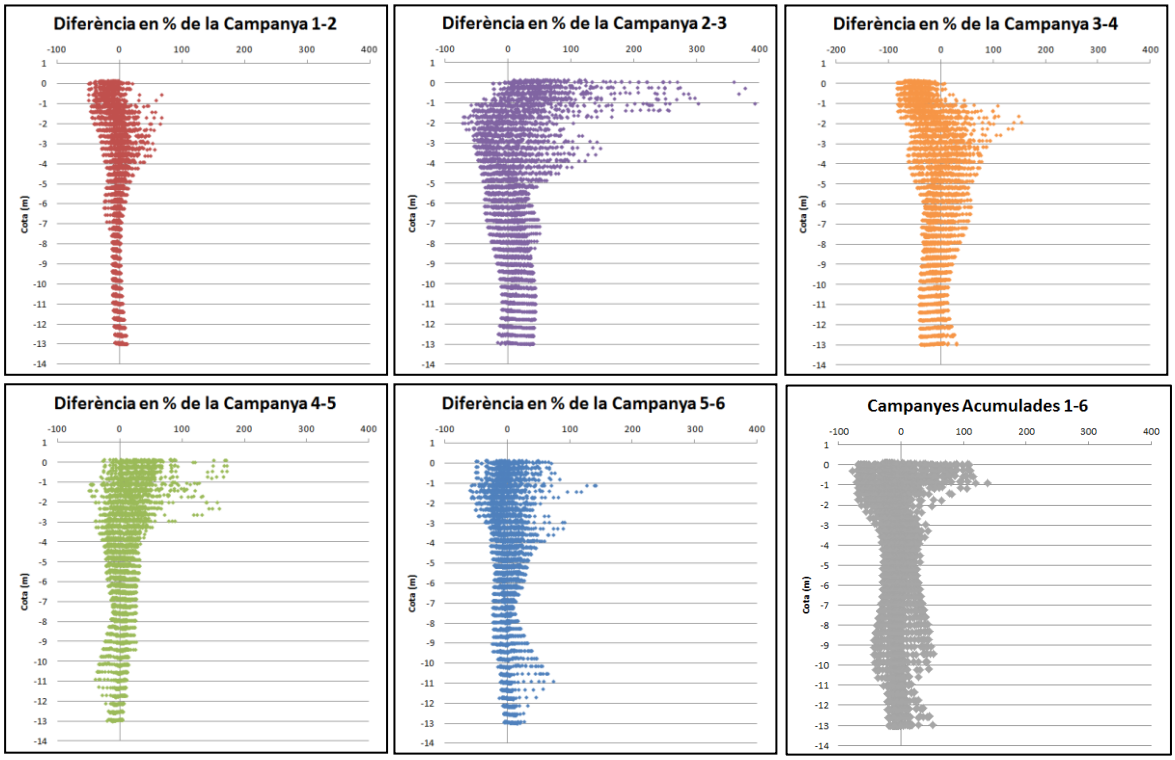


Figura 9: *Diferència de resistivitat (%) en fondària entre les diferents campanyes consecutives realitzades, i total acumulat.*

-Diferència entre campanyes 3 i 4: S'observa una disminució de les resistivitats en les capes superiors U1 i U2 del perfil per un augment de la humitat de la zona no saturada amb aigua amb grans quantitats d'aigua salina. Per altra banda a la capa més profunda (U3) es torna a observar una variació de les resistivitats en una mateixa capa (figura 9). Els materials sorrencs fins que formen aquesta capa, elements amb alta permeabilitat, poden ocasionar intrusions d'aigua salina per part del mar o condensar aigua amb nivells de conductivitat inferiors.

-Diferència entre campanyes 4 i 5: S'observa un augment considerable en les dues primeres capes superiors del perfil (U1 i U2). Aquest augment tan considerable (figura 9) podria estar ocasionat per una important aportació d'aigua dolça per part de les precipitacions. Mentre que a la zona més profunda s'observa una disminució focalitzada a les coordenades X de -45 a -10. Aquesta disminució de les resistivitats (figura 10), pot ser degut a la intrusió d'aigua salina per part del mar, degut a les característiques dels materials que formen aquesta capa.

-Diferència entre campanyes 5 i 6: S'observa una variació entre disminució i augment de les resistivitats en les dues primeres capes (U1 i U2) del perfil. La composició dels materials d'aquesta zona pot portar a una alternança de les condicions en el perfil ocasionat aquests resultats. La disminució pot estar ocasionada per l'augment de la saturació, mentre que les zones amb un augment de les resistivitats pot estar ocasionat per un assecament dels

materials. A la capa més profunda del perfil (U3) es torna a observar aquesta variació a causa de les característiques dels materials que la formen, podent ocasionar intrusions d'aigua salina per part del mar o condensar aigua amb nivells de conductivitat inferiors.

Per altra banda s'ha estudiat la diferència de resistivitats mitjanes (en %) en fondària (figura 100). Com s'observa a la figura 10, els canvis més importants es troben dins dels 2 primers metres de fondària. Aquests metres estan formats per les dues capes de materials abans esmentades (U1 i U2). Aquestes variacions en els primers metres pot ser degut a l'acció directa de les condicions climàtiques de la zona, ja sigui per augments de saturació degut a les precipitacions o per l'assecament dels materials i l'augment de l'evapotranspiració. Per altra banda s'observa una diferència important de les resistivitats mitjanes en profunditats d'uns 8 a 13 m. Aquests canvis també s'observen en els models de la figura 9 i poden ser causats per intrusions d'aigües salines o la presència d'aigua menys conductiva en els aqüífers.

Com s'observa tant a la figura 9 com a la figura 10, s'ha calculat l'acumulació de la variació de les 6 campanyes estudiades. Es pot observar com hi ha una concordança amb la variació entre campanyes amb una variació més pronunciada en els primers metres del perfil.

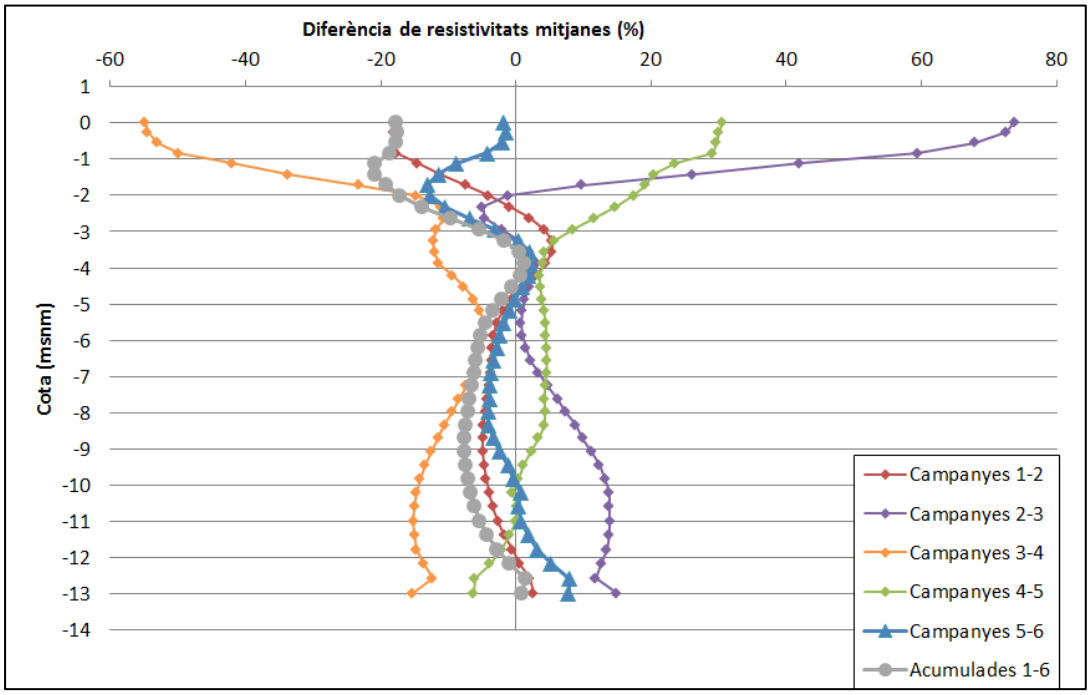


Figura 10: *Variació de resistivitats mitjanes en fondària (%).*

4.2.2 Factors inductors de canvis en la salinitat a la secció investigada

En aquest apartat s'ha determinat la relació que tenen els canvis de resistivitats observats amb el règim hídric i la salinitat de la zona estudiada. S'ha analitzat la situació en cada campanya respecte a la pluviometria (recàrrega superficial d'aigua dolça o assecament per manca de precipitacions), els nivells d'aigua a les llacunes i subsòl, el nivell del mar i l'efecte dels temporals més importants que comporten l'entrada d'aigua marina a la zona de les basses. Per

últim s'ha comprovat els valors de conductivitat elèctrica de l'aigua de les llacunes, del subsòl i del mar.

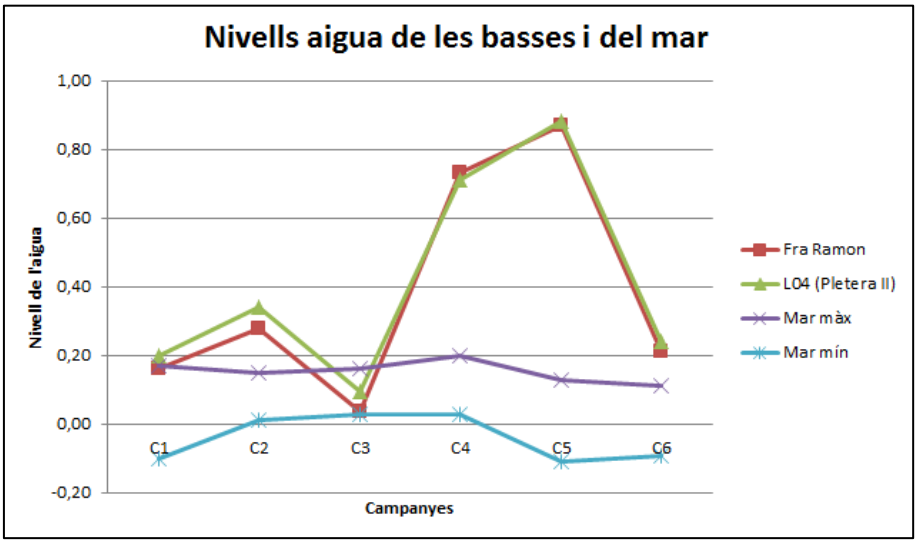


Figura 11: *Nivells de l'aigua de les basses de Fra Ramon i L04 i nivell mínim i màxim del mar Font: Servei de Control de Mosquits de la Badia de Roses i el Baix Ter i meteolestartit.cat*

Com s'ha determinat a la figura 11 i a la figura 12, hi ha una relació de la precipitació amb el nivell de l'aigua. Com s'observa, hi ha diferents èpoques on hi ha recarrega d'aigua i èpoques sense. Les èpoques de recarrega estan compreses entre les campanyes 1 i 2, les campanyes 3 i 4, i les campanyes 4 i 5. Aquestes recàrregues, estan relacionades amb l'augment del nivell de l'aigua (figura 11). Si relacionem aquestes èpoques de recarrega amb les variacions de resistivitat s'observa com disminueixen els valors de resistivitat en les primeres capes del perfil amb l'augment de les precipitacions i del nivell de l'aigua. Aquesta relació demostra com un augment de la saturació de la capa superior del perfil (U1) disminuirà la resistivitat del material. Per altra banda s'observa com a les èpoques sense recàrrega (campanyes 2-3 i 5-6) hi ha un augment de les resistivitats a la capa superior. Això confirma com un augment de l'evapotranspiració (assecament del material) portarà un augment de la resistivitat del material.

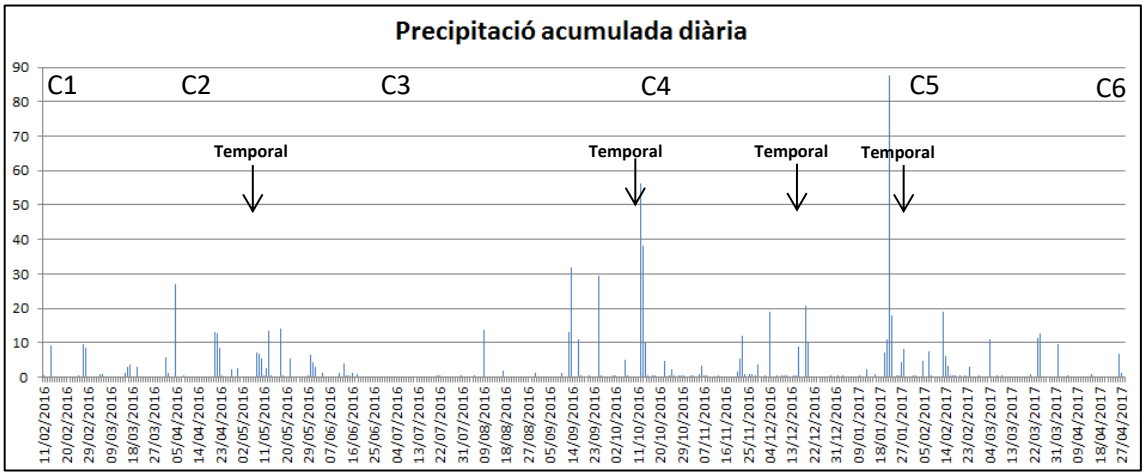


Figura 12: *Campanyes de mesura en relació a la precipitació acumulada diària i els principals temporals que impliquen entrada de mar a les llacunes (Font: ruralcat.net i meteolestartit.cat).*

Pel que fa al nivell del mar (Figura 11) s'observa com a la campanya 2 el nivell de les llacunes és inferior al nivell del mar. Aquest seria un factor que afavoriria l'entrada d'aigua marina per la zona alta de l'aqüífer, és a dir, baixades de resistivitats a les unitats U2 i U2, i pujades a la U1 per l'evaporació, com s'observa a les variacions de resistivitat de les campanyes 2-3.

Per altra banda s'han observat diferents dades dels efectes dels temporals en la zona d'estudi. S'han determinat quatre episodis principals de temporal compresos en tota la durada de l'estudi. Aquests temporals estan localitzats als mesos de Maig, Octubre i Desembre del 2016 i el Gener del 2017. Si relacionem aquestes dades amb la figura 13, observem com hi han precipitacions acumulades en aquells mesos. Aquests temporals han afectat les campanyes 4 i 5. El cordó de dunes litorals de la zona de la Pletera està degradat en diversos punts. L'aigua de mar aprofita aquests desperfectes per penetrar a la zona de les llacunes, sobretot a Fra Ramon, durant les llevantades més importats i seran moments en què hi haurà inundacions a la zona, barrejant-se amb l'aigua de les precipitacions, que haurà provocat baixades dràstiques de resistivitat a la zona alta de les seccions. Com s'observa a la relació de les campanyes 3-4 a la figura 10 hi ha una disminució important de la resistivitat en els 2 primers metres de fondària, confirmant l'efecte d'aquest temporal en els resultats de resistivitat calculats en el perfil.

4.3 Evolució de la humitat i salinitat a la zona no saturada

En aquest apartat s'ha estudiat la relació de la humitat amb la salinitat en la zona no saturada. S'han estudiat punts per campanya a dues profunditats: 0,15 i 0,45 metres i s'han relacionat dues mostres obtingudes mitjançant l'ERT i dues mostres obtingudes de les mostres extretes de la zona d'estudi. Primer s'han calculat les salinitats de les mostres extretes del sòl (Figura 13).

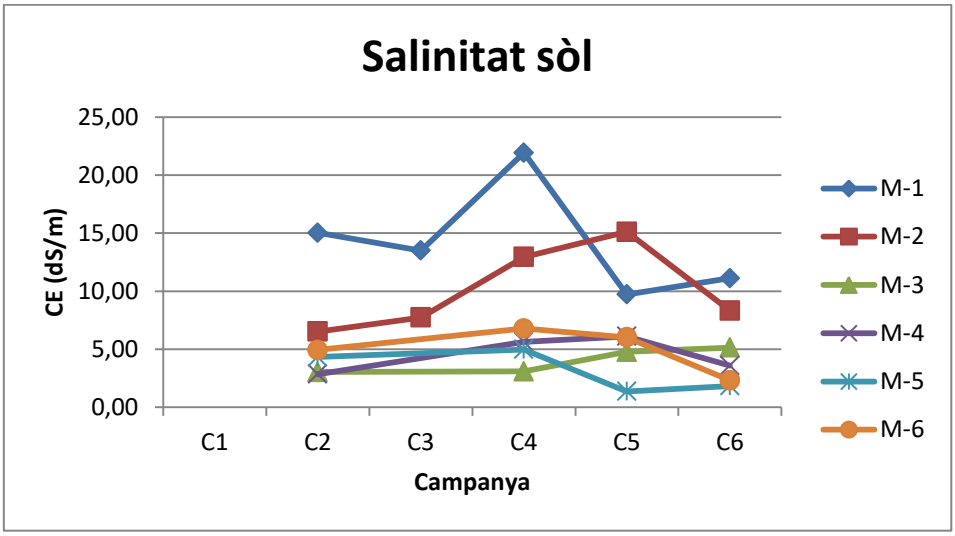


Figura 13: *Salinitat de les mostres extretes del sòl. M-1 (0,15m coordenada X 0,4), M-2 (0,45 coordenada X 0,4), M-3 (0,15 m coordenada X 30,4), M-4 (0,45 coordenada X 30.4), M-5 (0,15 coordenada X -29,6) i M-6 (coordenada X -29,6).*

S'observa a la figura 13 com les dues primeres mostres, tenen valors de salinitat superior que en les altres quatre mostres. Pràcticament tots els valors de la primera mostra són de caràcter molt salí, amb un pic extremadament salí a la campanya 4 i un mínim bastant salí a la campanya 5. A la figura 14 es tracta més concretament la mostra M-1 on hi ha presència d'episodis de pluja i temporal. Mentre que a la campanya 4 augmenta la salinitat gràcies a una major influència de l'entrada d'aigua marina per temporal, a la campanya 5 s'observa un descens de la salinitat per una major influència de les precipitacions. A la segona mostra s'observa com en les dues primeres campanyes i l'última són de caràcter moderadament salí, mentre que les campanyes 4 i 5 s'observa un augment pronunciat amb una qualificació de caràcter molt salí. A la tercera, quarta, cinquena i sisena mostra s'observen valors poc salins en general sense cap variació pronunciada.

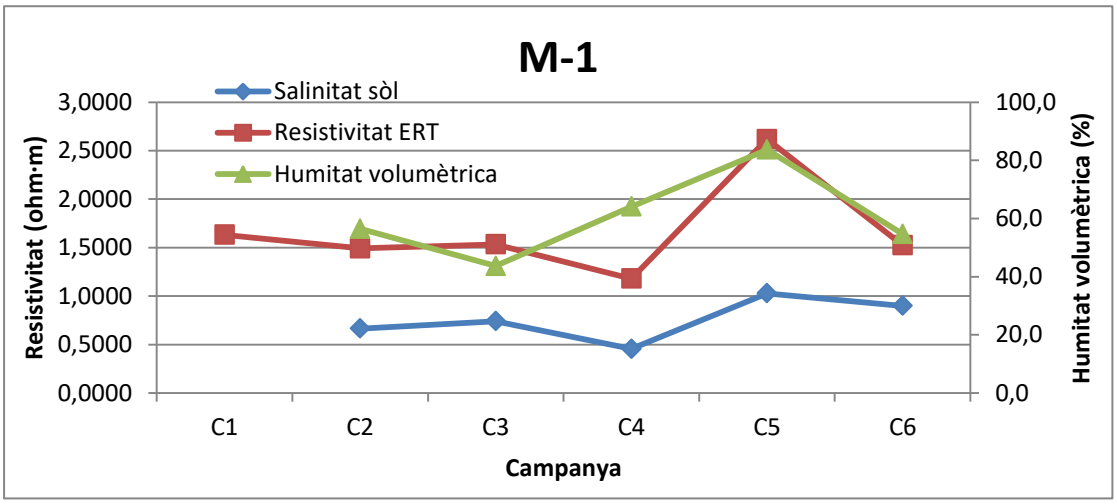


Figura 14: *Resum de la mostra 1 amb les dades de salinitat, resistivitat calculada (ERT) i humitat.*

S'han relacionat la resistivitat (ERT) amb la humitat volumètrica de les campanyes 2, 4 i 6 (són les campanyes amb valors més coherents) (Figura 15). Com es pot observar a la figura 15 hi ha una forta relació entre aquests dos factors. Un descens de la humitat volumètrica tant a 0,15 com a 0,45 m de fondària comporta un augment de la resistivitat, i per contra, un descens de la salinitat del sòl. Aquesta relació demostra com un assecament de la part superficial del perfil comporta un descens de la salinitat al sòl.

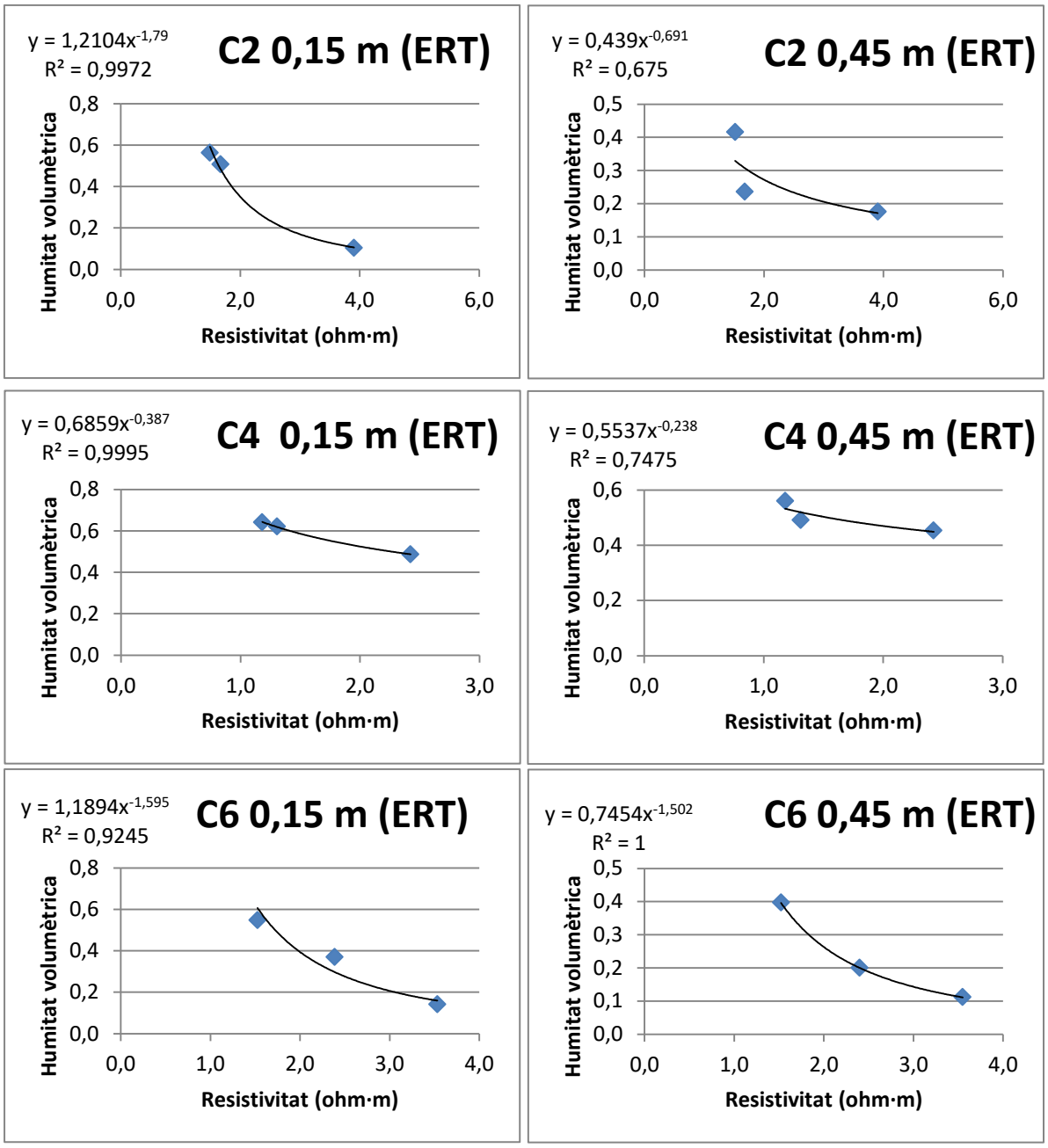


Figura 15: *Gràfics amb la relació entre la resistivitat calculada (ERT) amb la humitat volumètrica a 0,15 i 0,45 m de fondària. A) Campanya 2, B) Campanya 4 i C) Campanya 6.*

Per altra banda s'ha calculat la humitat volumètrica de tots els punts del model ERT tant a 0,15 com a 0,45 m. Per calcular-ho s'ha aplicat cada equació obtinguda en la figura 15 per a les respectives campanyes (Figura 16).

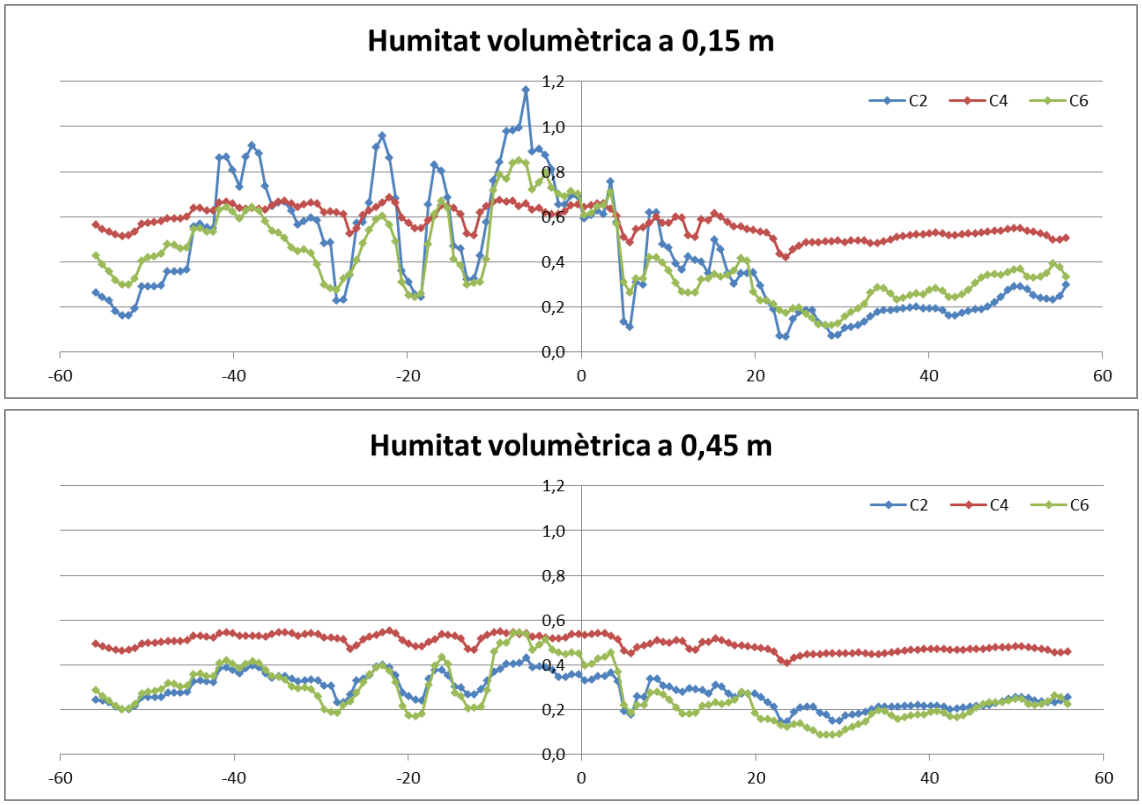


Figura 16: *Humitat volumètrica calculada al llarg de tots els punts del model (ERT) en les campanyes 2, 4 i 6.*

El primer que s'observa és l'homogeneïtat que hi ha a 0,45 m de fondària on no s'observa cap variació important d'humitat. Per altra banda a 0,15 m si s'observen valors més diversos per les campanyes 2 i 6 (la campanya 4 també pateix aquesta homogeneïtat). Les variacions en el perfil s'observen des de la coordenada X -60 fins a la coordenada X 20. Aquesta diferència tan significativa també s'ha observat en apartats anteriors (Figura 6) on els valors més representatius es trobaven en aquest sector del perfil que es veu més afectat per les condicions externes. L'homogeneïtat de l'últim sector del perfil pot ser degut a una capa molt fina que no ha detectat bé la tomografia de resistivitats elèctrica o que el material del sòl d'aquesta zona són diferents.

S'ha determinat la conductivitat elèctrica mitjana de l'aigua de saturació en aquest nivell per les campanyes 2, 4 i 6 a 0,15 i a 0,45 m de fondària. Els valors resultats a 0,15 m són: 45,9 mS/cm en la campanya 2, 13,5 mS/cm en la campanya 4 i 29,8 mS/cm a la campanya 6. Per altra banda els valors resultants a 0,45 m són: 48,3 mS/cm en la campanya 2, 18,1 mS/cm en la campanya 4 i 64,2 mS/cm a la campanya 6. S'ha observat com a les campanyes 2 i 6 s'observen valors de salinitat igual i superiors a la salinitat de l'aigua de mar. Aquests valors s'han assolit gràcies a una aportació d'aigua de mar en les capes superiores del perfil i absència d'altes precipitacions que diluïssin l'aigua salina, mentre que a la campanya 4 s'han observat valors inferiors per culpa de la dilució amb aigua dolça a causa de les altes precipitacions que va patir la zona setmanes abans.

4.4 Evolució de la salinitat a la zona saturada

En aquest apartat, s'ha calculat la conductivitat elèctrica de la saturació segons Archie en les diferents fondàries: -1, -1,9, -3,1, -5, -8,1 metres. Per calcular-ho s'han aprofitat els valors mitjans de les resistivitats de l'ERT. L'objectiu és observar l'evolució de la salinitat en fondària en la zona saturada.

Els nivells de conductivitat de les basses són bastant elevats, arribant a valors similars a l'aigua de mar (48 mS/cm). Pel que fa a les conductivitats del subsòl, s'observa com va augmentant de manera progressiva amb la fondària.

S'ha observat (Figura 17) com hi ha un augment progressiu de la salinitat arribant a una certa profunditat, a partir dels 5 metres de fondària, on ens trobem amb nivells de salinitat similars al mar. A la figura 17, s'ha observat una tendència que relaciona les oscil·lacions de les dues basses amb profunditats de -1 o -1,9 m. Fins i tot s'han observat moments en la bassa de Fra Ramon on la conductivitat és molt més alta que la de mar, això és degut als fenòmens d'evaporació i concentració en èpoques d'estiatge *(Rovira, 2016)* o per la possible entrada d'aigua per temporals que es pot donar a la campanya 4, però a la zona més superficial i no saturada del perfil.

Pel que fa a la zona saturada, el rang on s'ha vist més afectat per aigua salina és entre els -3,1 i els -5 m de fondària on s'assoleixen els valors de conductivitat similar al mar (s'ha calculat que sobre els -4 m s'assoleix aquest valor de conductivitat). S'ha determinat com l'aigua marina, en el subsòl, no s'aprecia una entrada directa a la zona de les llacunes a través dels materials a poca fondària, sinó que s'ha trobat una zona de mescla amb l'aigua de l'aqüífer que prové de les precipitacions. Aquesta mescla s'ha produït a causa de la composició dels materials del perfil, ja que tenen alts nivells de permeabilitat i confinen aqüífers amb aigües amb menys continguts en sals, i una vegada s'ha produït una intrusió d'aigua salina s'ha trobat aquesta mescla.

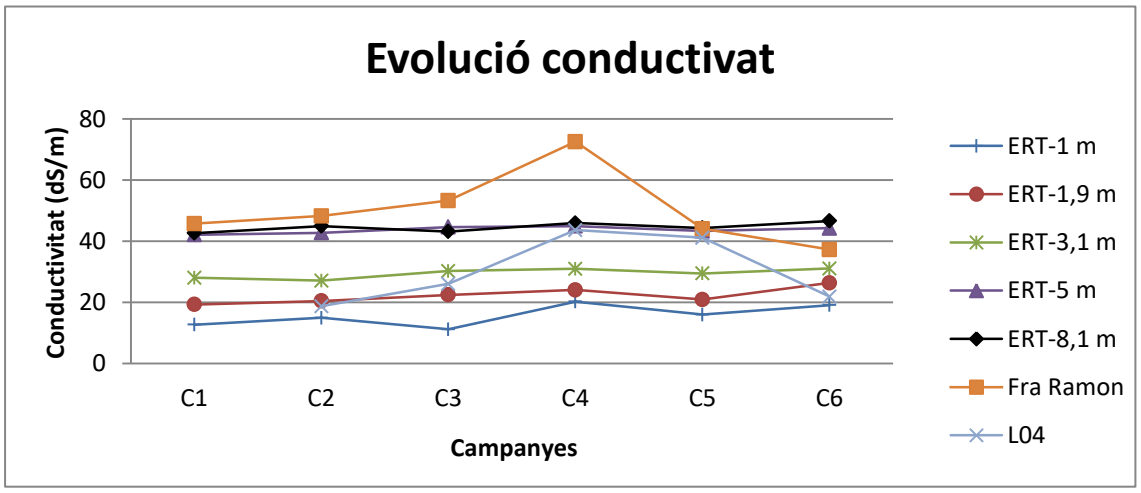


Figura 17: *Evolució de la conductivitat de l'aigua de saturació en fondària i a les basses de Fra Ramon i L04 en les diferents campanyes.*

4.5 Implicacions ambientals del règim de la salinitat a la Pletera

La Pletera és un espai amb alts continguts amb sals. Les seves basses contenen valors iguals o superiors als del mar, fet que ajuda a la població del fartet, únic peix que pot suportar aquestes condicions, per tant els nivells de salinitat són bastant importants per la protecció de la seva població i de la zona.

S'hauria de mantenir una concordança entre l'aigua amb alts continguts amb sals, amb l'aigua dolça. L'objectiu és no disparar l'excés de salinitat a les llacunes obtenint una mescla homogènia d'aquestes dues aigües, mantenint els episodis extrems que s'observa a les situacions climàtiques de tipus estival on les aportacions d'aigua es veuen molt afectades negativament. L'aportació més important d'aigua dolça ve de les precipitacions i els regadius de la zona, mentre que l'aportació més important d'aigua salina ve per l'aportació d'aigua marina superficial en els temporals. S'ha descartat l'entrada generalitzada d'aigua marina a través de les capes superficials de l'aqüífer, mentre es mantingui aquesta situació de mescla esmentada. Per sota dels 3 metres de fondària la incidència sobre l'ecosistema de la Pletera no és rellevant.

Una correcta planificació ha de contemplar la gestió d'aquest espai per retornar l'aspecte natural que els caracteritzava anys anteriors. S'hauria de fer un seguiment exhaustiu de totes les accions que es realitzin en aquesta zona per fer-ne un manteniment, per assegurar les condicions salines que necessita aquesta zona protegida. S'hauria d'evitar qualsevol creació de barreres artificials que obstaculitzin l'entrada d'aigua marina en èpoques de temporal, les quals s'han vist danyades per l'acció d'un temporal (observat a la campanya 5), cap a la llacuna del sector sud, la nostra zona d'estudi, ja que aquesta aportació és clau per mantenir aquests nivells de salinitat en la zona *(Gesti et al., 2005).*

Conclusions

This project has been based on a seasonal study started in February 2016 and completed in April 2017, with the objective of studying the variation of soil and water salinity of La Pletera restored wetlands and lagoons.

To carry out this study, there have been various quarterly campaigns with the technique of electrical resistivity tomography to get values in a specific profile of actual soil resistivity. The main objective was to study this temporal variation and relate it to various external factors, whether surface such as rainfall, the contribution of seawater and groundwater to the lagoons as the ratio of the humidity and the saturated zone electrical conductivity.

With all the calculated values and related have been achieved different results. To begin with, the most important of resistivity variations can be seen in the meters above the ground, which are more affected by the effects externs that the deeper layers. In the first few meters there is a variation between 20 and 80 % of the value of resistivity between campaigns. These layers have varied according to the season of the year and the climatic conditions of the area. Have been observed as the level of the gaps and the amount of rainfall have affected in a notorious

way these resistivities, linking the peaks of rainfall, as in the campaign 4, the contribution of water by the lagoons and the sea is increased by Decreasing the resistivity, and on the other hand, increasing the salinity of the soil. On the other hand you can observe a time of drought in the campaign 3 where resistivity values increased significantly, lowering the salinity levels of the first layers of the soil. In short, the first 2 meters above the ground are strongly related to precipitation levels and the interacion of surface water of the lagoons and the sea.

On the other hand it can be seen how this hypothesis is enhanced when there is a clear relationship between the humidity with the resistivity in the unsaturated zone. As humidity decrease, increases the resistivity and that, on the contrary, decrease the salinity of the soil. This relationship in the unsaturated zone gives more importance to the contribution of water by lakes and seas in temporary, to maintain the salinity levels that need this ecosystem to be maintained and the effect of rainfall in the dilution of the level of surface salinity.

In contrast, in the subsoil saturated areas you can see how the salinity increases in depth. This is due to the contribution of groundwater by the surrounding lagoons and the provision of a saline infiltration by the sea water.

In short, the salinity of this zone varies on a quarterly basis according to the climatic conditions of this. In times of greater precipitation and probability of temporary, salinity is increased thanks to the contribution of the water of the lagoons and the sea, on the other hand, a decrease in rainfall in times of drought, affected the salinity levels of very negative way diluted with fresh water supply by lowering the level of this. The area of the Pletera, is an ecosystem with high amounts of salinity, both on the ground, such as the Lagoons, therefore you have to condition the area to prevent the decline of these salinity values, by avoiding the construction of artificial barriers that prevent the entry of sea water to the area or prevent the provision of fresh water on the part of the surrounding agricultural areas.

6. Bibliografia

ACA. (2004). Fitxes de caracterització inicial, proessions i impactes de les masses d'aigua subterrànies. Fluviodeltaic del Ter. Recuperat de http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P2540018196126804673621 8&_nfls=false

Badosa, A., Quintana, X. D., Boix, D., & Brucet, S. (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. http://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.10.006

Benjamin, F. Mazdeline, E. Tingting Yan. (2008) Quantigyinf field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 362: 234-246.

Brunet, P., Clément, R. & Bouvier, C. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area , France. *Journal of Hydrology*, 380: 146-153.

Carol, E., Mas-Pla, J., & Kruse, E. (2013). Interaction between continental and estuarine waters in the wetlands of the northern coastal plain of Samboromb??n Bay, Argentina. *Applied Geochemistry*, 34, 152-163. http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.03.006

Carpio Hernandez, J. (2001). *Redes Topométricas*. Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas, Madrid.

Friedman, P. (2005) Soil properties influencing aparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 45-70.

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 Aquuàtica - Universitat de Girona, 103 p.

Geoservei, (2000) Estudio de las características hidrogeológicas y modelo de funcionamiento de la hidrodinàmica subterrània de las lagunas del Ter Vell y la Pletera (Baix Empordà). Universitat de Girona, Institut d'Ecologia Aquàtica – Geoservei, 108 p.

Geoservei (2016). Control en obra para la caracterización del sustrato litoral y la definición geomorfològica de la fase de restauración de lagunas en la Pletera. Tragsa – Geoservei, 157 p.

Hereu, B., Puigserver, D., Martí, E., Sierra, J., Illa, E., Barriocanal, C., … Gesti, J. (2012). Evaluación y diagnosis de los sistemas naturales del Baix Ter :, 1-123.

ICC (1995) Mapa geològic de Catalunya 1:25000 L'Estartit 297-1-2 (79-24). Servei Geològic de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya.

ICGC (2017) Institut Cartogràfic i Geològic de Cataluna, *Vissir3* Recupeat de http://www.icc.cat/vissir3/

IGME. (1983). Base geològica. Recuperat de http://territori.gencat.cat/ca/01_departament/12_cartografia_i_toponimia/bases_cartografiques/medi_ambient_i_sostenibilitat/cartografia_en_format_miramon_sig/bases_disponibles/territori/32_base_geologica/

Khalil MA, Nibterui Sabtis FA, (2009) Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity-Hydraulic Conductivity Relationship. *Surv Geophys* 30:601-615

Loke, M. H., I. Ackworth, and T. Dahlin (2003), A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.

Loke, M. H., I. (2014) Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. Geotomo Software, 180 p.

Martínez, J. Benavente, J. García-Aróstegui, J.L Hidalgo, M.C Rey, J. (2009) Contribution of electrical resistivity tomography to the sutdy of detrital aqüífers affected by seawater instrusion-extrusion effects: The river Vélez delta (Vélez-Málaga, Southern Spain). *Engineering Geology* 108: 161-168

Montaner, M. (2010). El flux hidrològic de la plana litoral del Baix Ter. Evolució fluvial, caracterització hidrològica i pautes de gestió. Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis, (ISSN 2013-5939), 236 p.

Pujol, J. (2003). Pla d'Acció Local per a la Sostenibilitat dels municipis del Baix Ter.

Rovira, L. (2016). Estudi de l'evolució hidroquímica i isotòpica de la llacuna de Fra Ramon. Memòria Treball Final de Grau, 33 p.

Zamorano, M. I Soler, D. (2004) Estudi geotècnic d'una parcel·la situada al carrer de la Dàlia, a la urbanització Els Griells de l'Estartit (Torroella de Montgrí-L'Estartit, Girona). Universitat de Girona – EGGA, 42 p.