

## **Pertorbacions Ionosfèriques**

Mar Altadill Cordero

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquest treball de recerca i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per a altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol del treball. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al web de la URL. Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts del treball com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de este trabajo de investigación y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título del trabajo. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al web de la URL. Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** The access to the contents of this research work and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the work must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside URL web is not allowed. These rights affect both the content of the work and its abstracts and indexes.

# PERTORBACIONS IONOSFÈRIQUES



MAR ALTADILL CORDERO  
2020/2021  
DEPARTAMENT DE FÍSICA  
M<sup>a</sup> DEL CARMEN GONZÁLEZ



**AGRAÏMENTS:**

En primer lloc m'agradaria agrair a la meva tutora del treball M<sup>a</sup> del Carmen González, la qual amb els seus consells m'ha permès executar el projecte amb efectivitat.

També agrair al Dr. David Altadill el fet de compartir amb mi observacions i coneixements que m'han guiat fins a obtenir els resultats del treball. Agrair-li també el seu suport i dedicació que també han sigut clau per poder tirar endavant el projecte de la millor manera possible.

Finalment, dono gràcies a l'Observatori de l'Ebre per compartir amb mi les dades necessàries per poder realitzar la part pràctica del treball amb efectivitat. No haguera estat possible sense la seva col·laboració.

Moltes gràcies a tots.



**ABSTRACT:**

La ionosfera és una capa de l'atmosfera caracteritzada per estar ionitzada. El fet que tingui ions i electrons lliures en el seu medi, permet que les ones electromagnètiques enviades pels diferents aparells, com en serien el satèl·lit o el sondejador ionosfèric, es puguin propagar llargues distàncies, transportant així, informació. Tot i això, la ionització ionosfèrica també ens aporta inconvenients, ja que es creen irregularitats que alteren la propagació de les ones i, consegüentment, l'arribada d'aquestes al receptor i la informació que contenen. Així doncs, aquest treball consisteix en establir una relació entre els dos mètodes d'observació esmentats anteriorment fent referència a la detecció d'aquestes pertorbacions en determinades zones del planeta.

Amb l'estudi realitzat, he obtingut que el sistema satel·lital i el sondejador ionosfèric tenen una dependència respecte als temps de detecció de les irregularitats ionosfèriques. Aquest resultat m'ha permès calcular la velocitat i la dimensió de les pertorbacions observades. Amb aquesta informació, es pot preveure en quin zona de l'espai i en quin moment hi haurà una pertorbació que ens alteri la propagació de les ones, de tal manera que es podrà saber en quins moments la informació rebuda pot ser errònia.

La ionosfera es una capa de la atmósfera caracterizada por estar ionizada. Al tener iones y electrones libres en su medio, ésta permite que las ondas electromagnéticas enviadas por los distintos mecanismos, como lo serían los satélites o el sondeador ionosférico, se puedan propagar a largas distancias, transportando, de este modo, información. Aún así, la ionización ionosférica también nos aporta inconvenientes, ya que se crean irregularidades que alteran la propagación de las ondas y, por consiguiente, la llegada de estas al receptor y la información que contienen. Así pues, este trabajo consiste en establecer una relación entre los dos métodos de observación citados anteriormente haciendo referencia a la detección de estas perturbaciones en determinadas zonas del planeta.

Con el estudio realizado, he obtenido que el sistema satelital y el sondeador ionosférico tienen una dependencia respecto los tiempos de detección de las irregularidades ionosféricas. Este resultado me ha permitido calcular la velocidad y la dimensión de las perturbaciones observadas. Con esta información, se puede prever en qué zona del espacio y en qué momento habrá una perturbación que altere la propagación de las ondas, de modo que se podrá determinar en qué momentos la información recibida puede estar equivocada.

The ionosphere is a layer of the atmosphere characterized for being ionized. The fact that it has ions and electrons in its means, allows electromagnetic waves sent by divers systems, such as satellites or ionospheric sounders, to propagate along large distances, carrying, this way, information. However, the ionospheric ionization has also issues, as it causes the creation of irregularities that disrupt the propagation of the waves and, consequently, the arrival of those and its information. As a result, this project consists in establishing a relation between both observation methods, which were said before, regarding the detection of those perturbations in specific zones of the planet.

With this study, I have been able to obtain that the satellite system and the ionospheric sounder have a dependence regarding the detection times of the ionospheric irregularities. The results, made possible to calculate the speed and the dimensions of the perturbations that have been observed. With this information, it can be predicted the place where the perturbation that alters the propagation of the waves will be. Thus, people will be able to know when the information that is being received might be wrong.

## ÍNDEX:

1. Introducció.....	8
2. La llum, ressenya històrica.....	10
a. Teoria corpuscular.....	10
b. Teoria ondulatòria.....	10
c. Dualitat ona-corpúscle.....	11
3. Les ones.....	13
a. Què és una ona?.....	13
b. Tipus d'ones.....	13
i. Mecànica.....	13
ii. Electromagnètica.....	14
iii. Gravitatòries.....	15
c. Característiques de les ones.....	15
i. Amplitud .....	15
ii. Longitud d'ona.....	16
iii. Període .....	16
iv. Freqüència.....	17
d. L'espectre electromagnètic.....	17
4. Propietats de les ones: fenòmens ondulatoris.....	19
a. Índex de refracció.....	19
b. Reflexió i Refracció.....	19
c. Dispersió.....	20
d. Polarització.....	21
e. Interferència i Difracció.....	22
5. La ionosfera.....	24
a. Formació de la ionosfera: T. Chapman.....	24
b. Propietats.....	28
c. Mètodes d'observació.....	29
6. Irregularitats ionosfèriques. Bombolles de plasma.....	36
7. Pràctica.....	44
a. Dades.....	44
b. Experiment.....	46
c. Resultats.....	48
i. Resultats Atlàntic.....	48
ii. Resultats Pacífic.....	53
iii. Resultats Perú.....	58
d. Discussió i Conclusions.....	63
8. Bibliografia/webgrafia.....	69





## 1. INTRODUCCIÓ

D'un principi tenia present la idea de fer el treball de recerca sobre un tema relacionat amb la biologia, amb tot, com es pot comprovar, el tema finalment escollit no té res a veure amb aquesta.

Vaig decidir-me per un treball molt més relacionat amb el camp de la física, les ones i el soroll, ja que, fent recerca, vaig trobar que certs grups, com per exemple, grups de La Salle, Universitat Ramon Llull (URL), duïen a terme treballs d'investigació on, a partir del soroll, troben informació molt concreta, i aquest fet em va cridar l'atenció. Per exemple, en un d'aquests estudis a la Salle URL, s'esbrinava el tipus de moixó que hi havia en una zona únicament a partir del soroll que aquest produïa.

A partir d'aquí, vaig continuar preguntant a persones relacionades amb el tema i, a l'Observatori de l'Ebre, em van presentar un treball que em va semblar del tot interessant. Aquest es centra en la ionosfera i l'estat d'aquesta i com els diferents estats que pot tenir, tranquil o sorollós, poden afectar a la nostra vida quotidiana.

La ionosfera és una part de l'atmosfera que està ionitzada; té càrregues lliures, i això fa que tingui la peculiaritat de modificar la propagació d'ones de ràdio i afectar a les comunicacions per radiofreqüència (R-2). Així, si la ionosfera no està en un estat tranquil, és a dir, es troba en un alt nivell d'activitat o pertorbada, pot afectar directament a la comunicació o, simplement, inhibir-la per complet. Per exemple, quan hom està conduint i va navegant amb el GPS, si el senyal dels satèl·lits travessa una zona on la ionosfera està molt activa i presenta moltes perturbacions, es poden provocar certes interferències que impedeixen continuar funcionant correctament al sistema. Per tant, si a partir del soroll podem esbrinar on es troben les zones pertorbades que deterioren la comunicació, es pot alertar sobre la situació d'aquestes i conèixer que la informació rebuda pot ser errònia.

Doncs bé, em va semblar realment atractiu que, a partir del soroll que hi pugui haver en un moment determinat en la ionosfera, es pugui determinar si hi ha probabilitat d'haver interferències i, com a conseqüència, d'afectar a la nostra comunicació habitual. Conseqüentment, i vaig decidir realitzar el treball de recerca sobre aquest tema.

Al llarg d'aquest treball s'expliquen conceptes els quals permeten entendre'l al complet. Per poder realitzar un treball entenedor, aquest seguirà la següent estructura.

En primer lloc, faré una introducció històrica per tal de situar el lector i, a més a més, una explicació dels fenòmens que tenen lloc en la part pràctica del projecte. De la mateixa manera, descriuré els conceptes que permetran entendre amb més facilitat el projecte. Per exemple, exposaré el terme llum i inclouré una mica de la història d'aquesta, definiré el concepte d'ona i les seves característiques i, també, presentaré els fenòmens més rellevants i relacionats amb el treball que aquestes protagonitzen.

En segon lloc, explicaré la ionosfera, les seves propietats i formació. Aquesta capa és en la qual es troba l'objecte d'estudi del treball. Per tant, en la segona part del

projecte explicaré quins són els mètodes d'observació de la ionosfera utilitzats principalment. En aquest apartat, per tant, també exposaré l'objecte d'estudi, les bombolles de plasma equatorial.

Finalment, presentaré l'experiment realitzat amb el procediment i resultats. Un cop exposats aquests punts realitzaré unes conclusions i discussions dels resultats obtinguts, si aquests eren els esperats o no i el motiu de l'obtenció d'aquests resultats.

## 2. RESSENYA HISTÒRICA: LA LLUM

La llum com a concepte ha estat un dels principals trencaclosques dels científics durant molts anys.

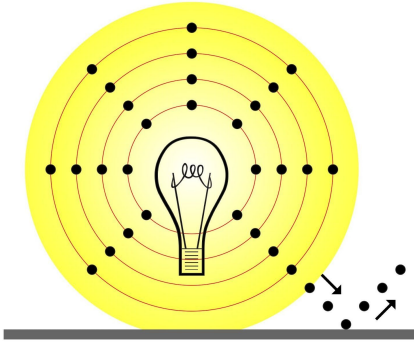

Antigament, es pensava que era una “cosa” emesa pels mateixos ulls. Anys després, es van adonar que la llum no procedeix de l'òrgan de la vista. Per tant, els científics es van començar a plantejar què era aquesta realment. A partir d'aquest punt, la llum serà definida mitjançant dues teories (R-1).

### a. TEORIA CORPUSCULAR

Aquesta va estar proposada pel científic Isaac Newton l'any 1704.



Newton defensava que la llum està formada per un feix de partícules molt petites anomenades fotons. Aquests fotons són una mena de corpuscles lluminosos que transporten energia. Segons la teoria, la llum es desplaça seguint una línia recta i a gran velocitat.

El concepte de fotó el va definir Albert Einstein, científic que, més endavant, comprovaria que la llum no només és una ona o un feix de fotons, sinó que és una combinació dels dos anteriors (R-1).

	
<p><b>Figura 1</b> Imatge que mostra la teoria corpuscular de la llum on s'observa com la llum és definida per petites partícules (R-17)</p>	<p><b>Figura 2</b> Fotografia d'Isaac Newton, científic que va proposar la teoria corpuscular de la llum prèviament esmentada. (R-18)</p>

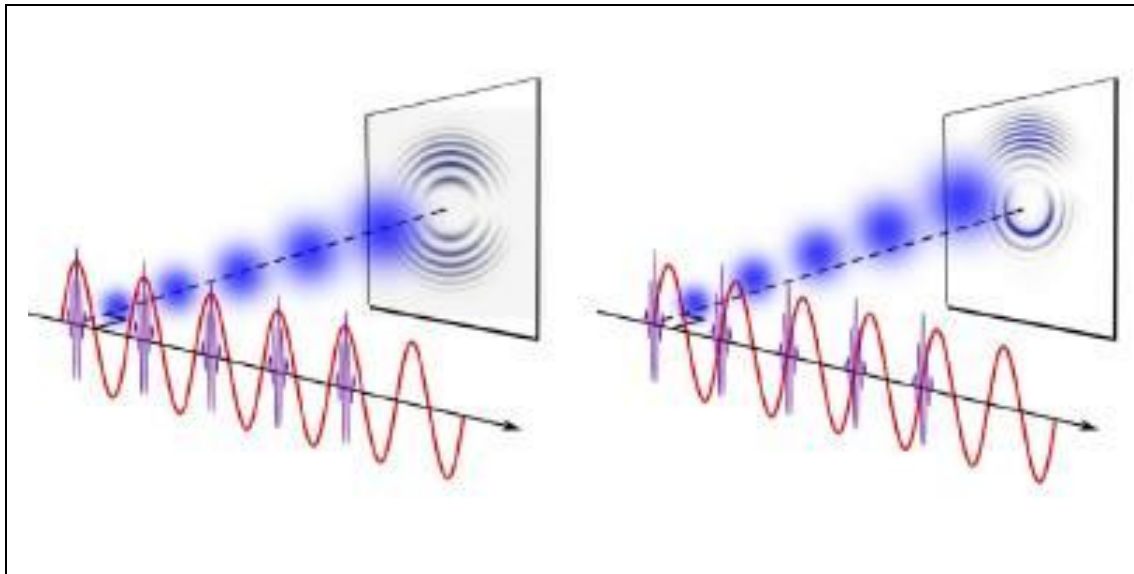
### b. TEORIA ONDULATORIA

El principal defensor d'aquesta teoria fou el científic Christian Huygens. Aquest defineix la llum com a una ona, com un moviment ondulatori, que es desplaça al llarg d'un medi anomenat èter. Per permetre la propagació de la llum, el medi ha d'estar format per un material molt elàstic i ha d'omplir-ho tot, fins i tot el buit, ja que la llum també es pot desplaçar per aquest (R-3).

	
<p><b>Figura 3</b> Figura que reflexa la concepció de la llum com una ona, justificant així la teoria ondulatoria de la llum. (R-19)</p>	<p><b>Figura 4</b> Fotografia del científic Huygens, el qual va presentar la teoria ondulatoria de la llum. (R-20)</p>

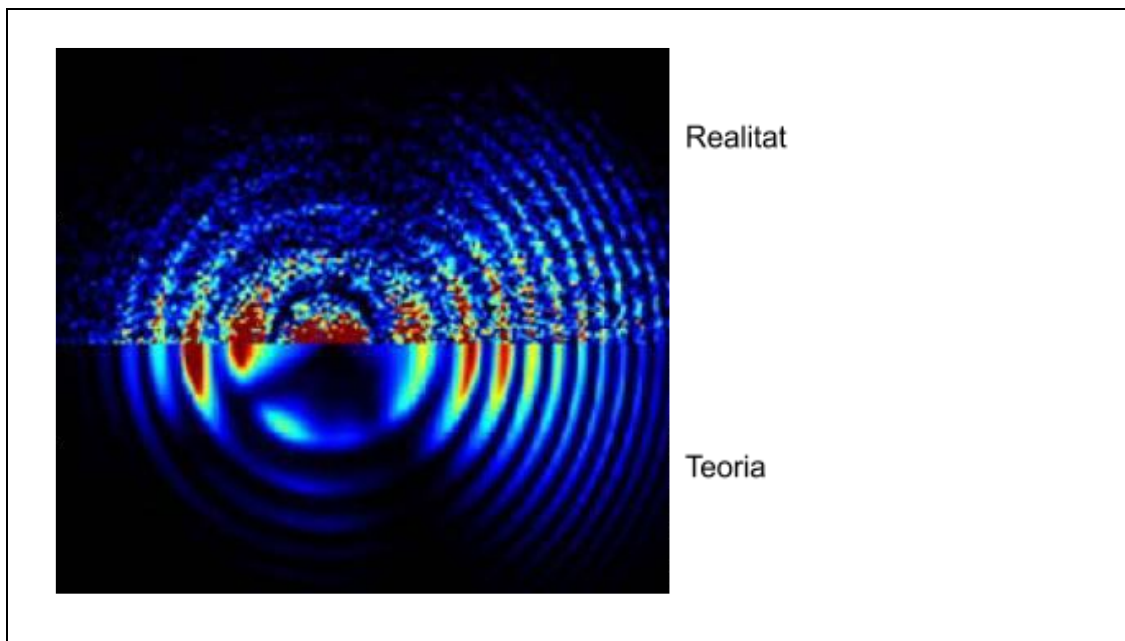
### c. DUALITAT ONA-CORPUSCLE

Durant molts anys, la teoria acceptada que definia el concepte de llum era la corpuscular, a causa del nom i importància d'Isaac Newton. Més tard, però, científics com Young o Maxwell van dur a terme experiments on els resultats obtinguts només es podien entendre a partir de la teoria ondulatoria, és a dir, la presentada per Huygens. D'aquesta manera, doncs, es creia que la teoria que definia la llum era l'ondulatoria però, un cop més, es van realitzar certes proves on els resultats eren pràcticament impossibles d'explicar únicament amb la teoria defensada primerament per Huygens. Aquests experiments, realitzats per Albert Einstein, van conduir que Einstein presentés l'any 1905 una nova teoria on conviuen equitativament les dues anteriors. Per al científic, quan la llum interacciona amb matèria, els fenòmens produïts, només es poden explicar amb la teoria corpuscular, ja que no apareix en cap moment un comportament ondulatori. De la mateixa manera, si remuntem als experiments de Maxwell es demostra perfectament que la llum actua com una ona. En conseqüència, el concepte de llum és explicat mitjançant la combinació de les dues teories, conseqüentment, la llum té un caràcter tant ondulatori com corpuscular (veure figures 5 i 6), (R-1).



**Figura 5**

Imatge on es pot observar l'estat dual de la llum (ona-còrpuscle) a través d'un medi com en seria l'aire. La figura mostra com la llum és, a la mateixa vegada, un conjunt de partícules (fotons), en quant interacciona amb la matèria, i una ona electromagnètica. (R-21)



**Figura 6**

De la mateixa manera que en la imatge anterior, aquesta també ens justifica la teoria de la dualitat ona-còrpuscle de la llum. En aquest cas, la part de la imatge més definida (la inferior) reflexa la teoria ondulatoria de la llum, ja que només apareixen ones desplaçant-se al llarg del medi en el qual s'ha realitzat la imatge. En canvi, la imatge superior, la que reflexa la realitat, es pot veure la combinació de les dues teories, perquè, alhora, s'observen petits punts, els quals corresponen als fotons, i també ones. (R-22)

### 3. LES ONES

#### a. QUÈ ÉS UNA ONA?

Una ona és una pertorbació o variació d'alguna magnitud física o propietat de l'espai que es propaga d'un punt a un altre, transportant energia entre aquests dos punts (R-1; R-4). Com per exemple la densitat o la pressió o com es pot observar en les figures 7 i 8. La propagació d'aquesta pertorbació implica un transport d'energia però no de matèria. En canvi, l'espai en el qual es transfereixen les ones sí pot contenir matèria, un clar exemple en serien l'aire o l'aigua. De la mateixa manera, les determinades ones també es poden propagar pel buit.



**Figura 7**

Imatge on s'observa la propagació d'ones sobre una superfície líquida instants després d'un impacte d'un objecte o d'una irregularitat. (R-23)



**Figura 8**

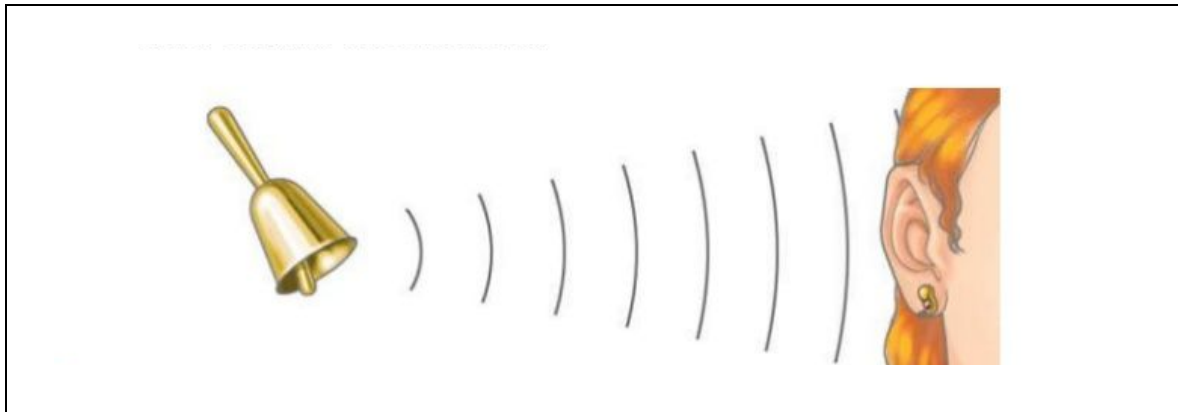
Imatge que mostra la propagació d'ones sonores en un medi determinat. (R-24)

#### b. TIPUS D'ONES

Les ones es poden classificar atenent a diferents conceptes i en base a diferents criteris. En aquest treball només citarem els tipus d'ones segons el medi en el qual es propaguen. Atenent a aquest criteri les ones es classifiquen de la següent manera (R-1; R-4):

##### i. Ona mecànica

Les ones mecàniques són les alteracions o pertorbacions de les propietats mecàniques d'un medi físic, aquelles que causen una vibració o pertorbació en les partícules del medi per on es desplacen. En resum, són aquelles que requereixen d'un medi per poder propagar-se al llarg de l'espai. Un exemple en serien les ones sonores, es desplacen a través de l'aire (figura 9).



**Figura 9**

Exemple d'ona mecànica, en aquest cas sonora. S'observa que necessita un medi per a desplaçar-se, concretament l'aire. (R-25)

## ii. Ona electromagnètica

Les ones electromagnètiques es basen en la propagació de la variació del camp elèctric i del camp magnètic, aquesta variació és provocada per transicions electròniques dins dels àtoms que pertanyen a la font de les ones. Per tant, són aquelles que no depenen d'un medi per poder propagar-se, és a dir, es poden desplaçar pel buit. Un exemple en serien les ones de ràdio (figura 10).



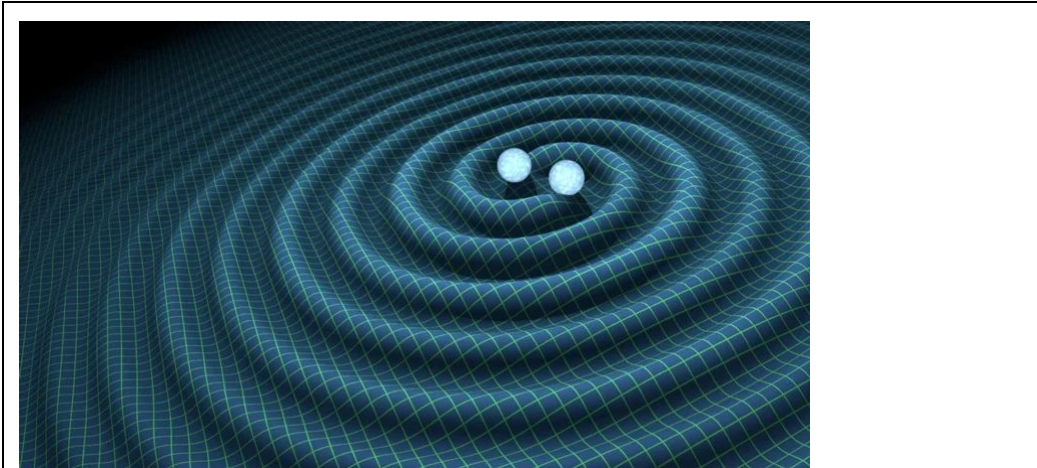
**Figura 10**

Exemple d'ones que s'estan propagant pel buit, consegüentment, són ones electromagnètiques. En la figura s'observa com, en tot moment, vivim envoltats d'aquest tipus d'ones sense adonar-nos. (R-26)



### iii. Ona gravitacional

Les ones gravitacionals són pertorbacions que alteren la geometria pròpia de l'espai-temps i, encara que es representen propagant-se a l'espai, tècnicament no es pot afirmar que es desplacen sinó que en si són les alteracions de l'espai temps.



**Figura 11**

Aquesta imatge és una representació gràfica del que són les ones gravitacionals. (R-27)

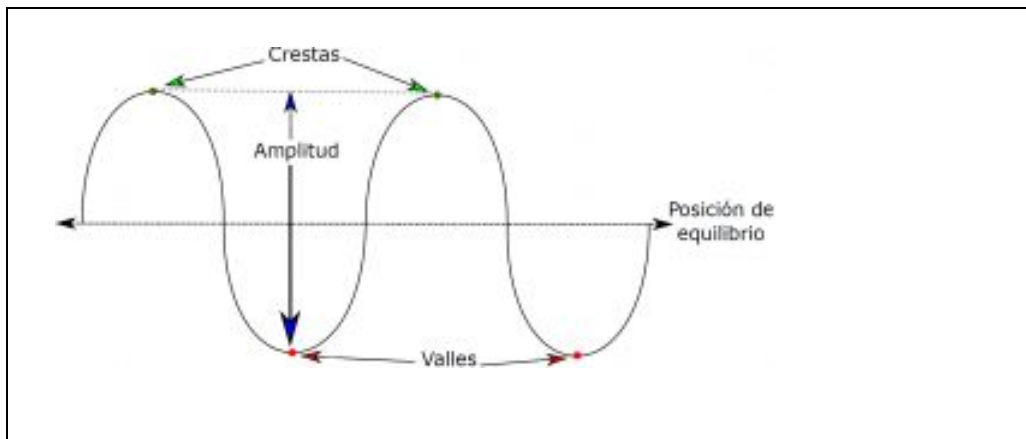
\*Aquest estudi es basarà en els efectes sobre la propagació de les ones electromagnètiques causats pel medi per on es propaguen.

### c. CARACTERÍSTIQUES DE LES ONES

- (R-1; R-5)

#### i. Amplitud

L'amplitud d'ona és el valor màxim de la pertorbació o variació de la magnitud física que es propaga. En altres paraules, és el valor més alt que registra una magnitud física en el temps de variació, respecte del punt d'equilibri. Per tant, aquesta característica és la distància que hi ha des del valor més alt obtingut fins al punt d'equilibri, tal com il·lustra la figura 12.

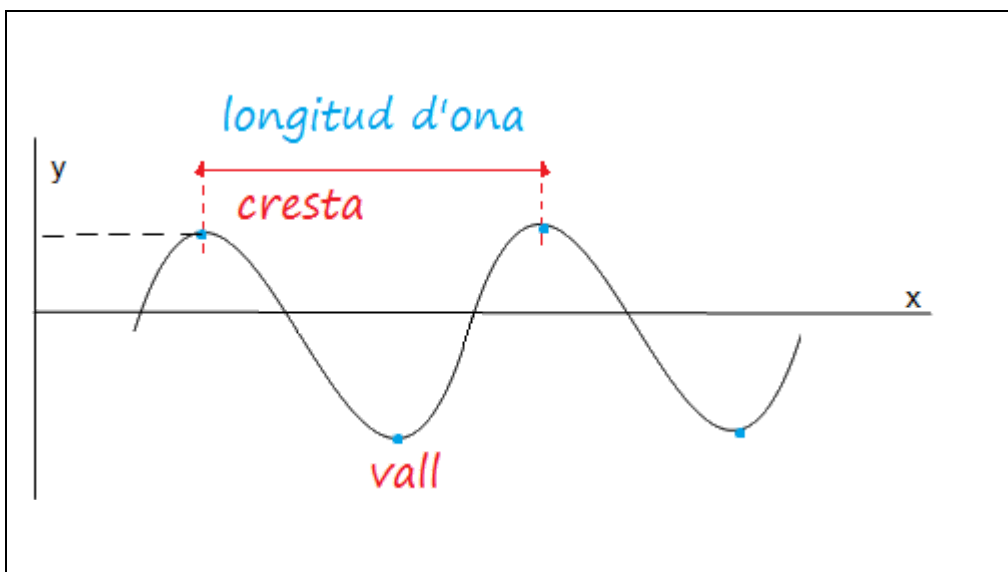


**Figura 12**

Imatge que mostra la definició d'amplitud d'una ona. (R-28)

### ii. Longitud d'ona ( $\lambda$ )

Aquesta magnitud és la distància que hi ha entre dos punts on l'ona es repeteix, és a dir, dos punts de l'ona que estan en el mateix estat de vibració.



**Figura 13**

Figura on es pot observar el concepte de longitud d'ona. (R-29)

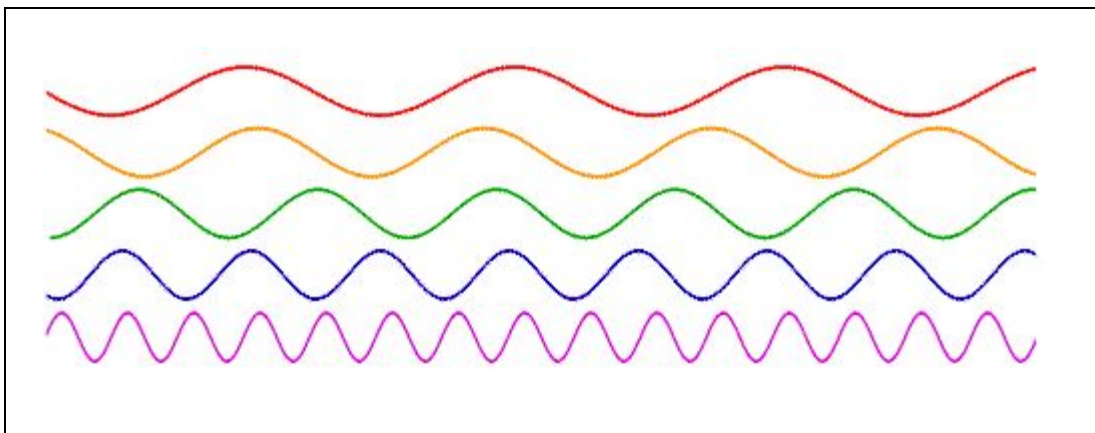
### iii. Període (T)

El període és el temps que tarda l'ona a propagar-se una longitud d'ona. En altres paraules, el temps que ocupa l'emissió de dues ones consecutives. La seva unitat de mesura és el segon (s).

#### iv. Freqüència (f)

La freqüència d'una ona és el nombre de vegades que aquesta es repeteix, oscil·la, en un cert període de temps i la seva unitat de mesura és el  $s^{-1}$  o, també, l'Hz. Aquest concepte està plenament relacionat amb la longitud d'ona, ja que també es pot definir com: el nombre de longitud d'ona que han tingut lloc en un cert període de temps. En conseqüència, com més alta sigui la freqüència, més curta serà la longitud d'ona. Així doncs, si tenim en compte aquesta última definició de freqüència i el terme període, podem dir que el període és la inversa de la freqüència i viceversa i la seva relació es pot obtenir mitjançant l'expressió següent:

$$f = \frac{1}{T}$$



**Figura 14**

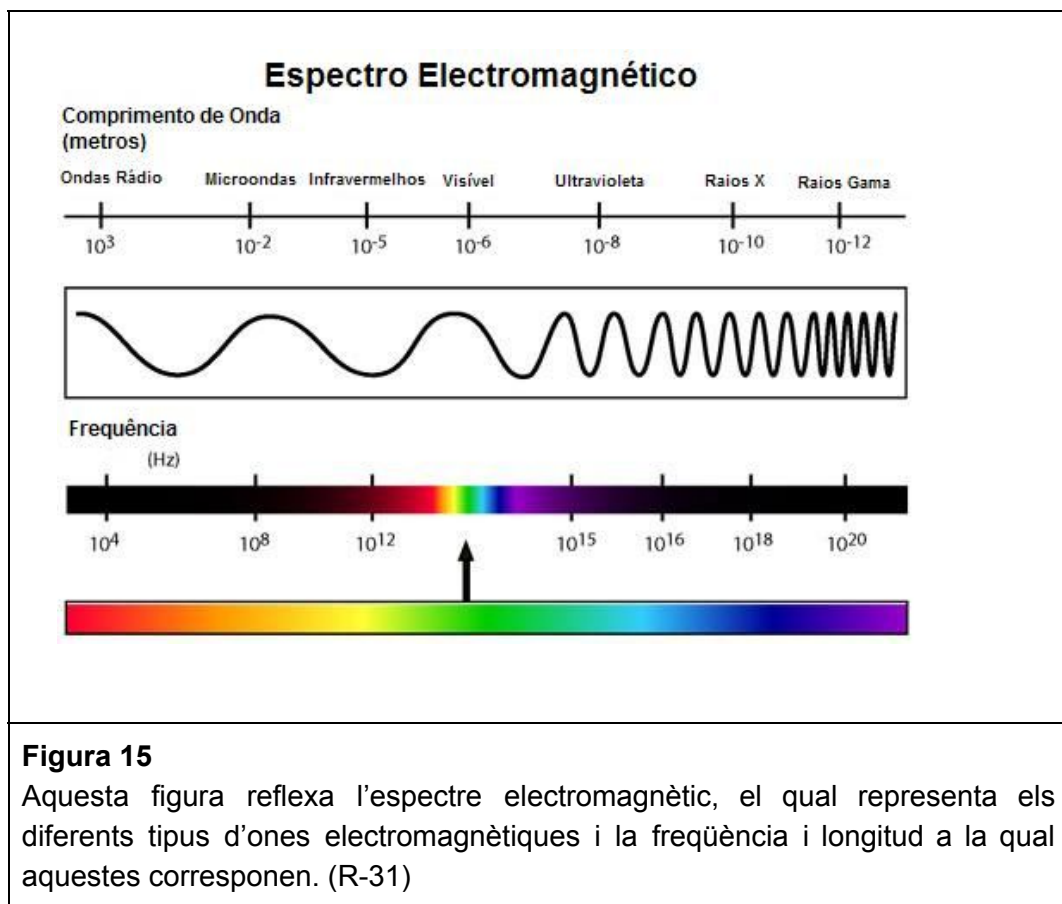
Aquesta imatge ens mostra la relació entre freqüència i longitud d'ona, com més alta és la freqüència, més petita és la longitud d'ona i viceversa. (R-30)

#### d. L'ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC (R-1)

Tal com he mencionat anteriorment, aquest estudi es basa en l'anàlisi dels efectes de la propagació d'ones electromagnètiques (a partir d'ara ones EM). Per aquest motiu ens fixarem més en aquest tipus d'ones i les seves característiques. Les ones EM són variacions del camp elèctric i del camp magnètic perpendiculars a la direcció de propagació les quals es propaguen a la velocitat de la llum en el buit ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Ateses les diferents freqüències, les ones EM es classifiquen amb el que es coneix com a espectre electromagnètic, en el qual es defineixen les següents bandes de freqüència (R-1):

- Ones de radiofreqüència (3 Hz-3 GHz): s'apliquen en comunicació, principalment en la televisió.
- Microones (300 MHz-300 GHz): s'apliquen en electrodomèstics com forns o microones (aparells amb l'objectiu d'escalfar aliments), també en radars i en telefonia sense fils.

- Infraroig (300 GHz-400 THz): s'apliquen per saber la temperatura d'objectes a distància, en equips de visió nocturna i en sistemes de comunicació entre aparells electrònics.
- Llum visible (400-780 nm): conté tots els colors de l'arc de Sant Martí. És l'única radiació detectada pels ulls humans.
- Ultraviolat ( $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz- $3 \cdot 10^{17}$  Hz): capaç de destruir bacteris i més aplicacions mèdiques. Una llarga exposició a aquest tipus de radiació provoca cremades a la pell.
- Raig X ( $3 \cdot 10^{17}$  Hz- $5 \cdot 10^{19}$  Hz): Té utilitats mèdiques, com ara radiografies; utilitats industrials, inspecció de la qualitat de certes peces metàl·liques; utilitats científiques, determinació d'estructures cristal·lines i, per últim, utilitats artístiques, comprovació de l'autenticitat de les obres i en restauració de quadres.
- Raig gamma ( $10^{20}$  Hz o major): és la radiació més energètica. Per tant, és la més perjudicial per als ésser humans. És emesa pels àtoms radioactius.



Com a exemple, la llum és una ona electromagnètica que el nostre sentit de la vista pot distingir. La llum visible se situa en la zona de l'espectre que ocupa des dels 400

als 780 nm. Cada color que observem en aquest espectre (del violet al vermell) correspon a una longitud d'ona o freqüència diferent.

En aquest treball ens centrarem en l'estudi de les ones EM de radiofreqüència, concretament, en aquelles amb freqüències de l'ordre de MHz ( $10^6$  Hz) i de l'ordre de GHz ( $10^9$  Hz), les quals tenen una utilitat pràctica en el món de la ciència i tecnologia.

#### 4. PROPIETATS DE LES ONES: FENÒMENS ONDULATÒRIS

A continuació es descriuran breument algunes propietats de les ones, de les quals en faré ús en la part pràctica del projecte. (R-1; R-6; R-7; R-8; R-9)

##### a. Índex de refracció (n)

L'índex de refracció és el concepte que ens permet comparar la velocitat a la qual la llum es propaga en els diversos medis. Aquest es basa en la següent fórmula:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{Fórmula 1}$$

On  $c$  és la velocitat a la qual es propaga la llum en el buit i on  $v$  és la velocitat a la qual es propaga la llum per un altre medi determinat.

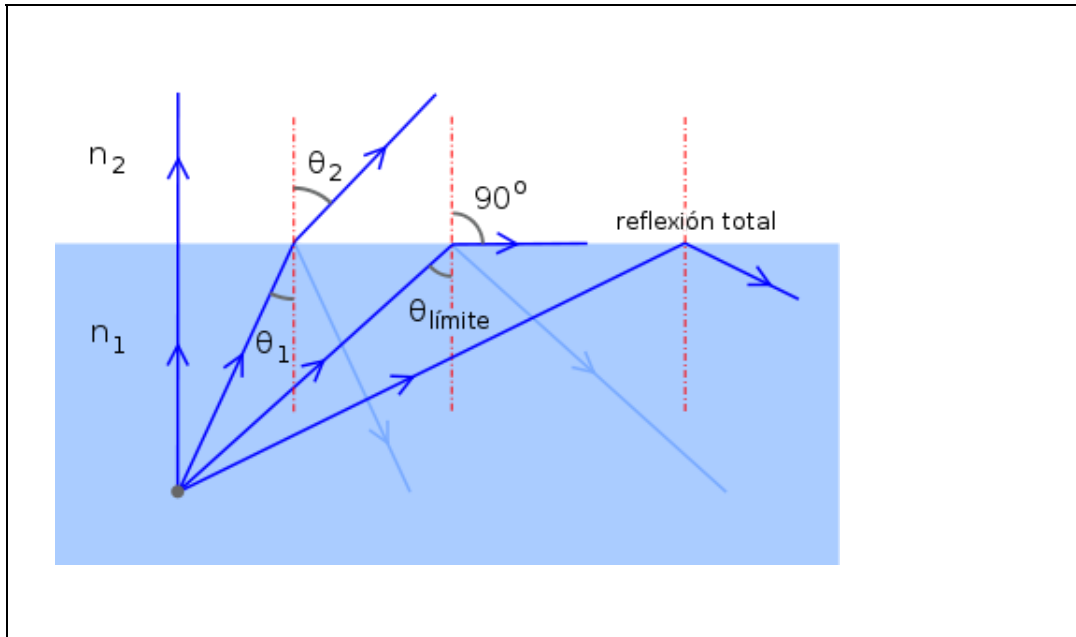
Tenint en compte aquesta definició, el valor  $c$  sempre serà major al valor  $v$ , en conseqüència, el valor obtingut sempre serà major d'1. Per tant, com més gran sigui el resultat, és a dir, l'índex de refracció d'un medi determinat, més lentament viatjarà la llum pel seu interior.

##### b. Reflexió i Refracció

D'una banda, la reflexió d'una ona és el fenomen que té lloc quan una ona canvia de direcció dins d'un mateix medi després d'impactar o d'interaccionar amb un altre medi diferent. D'altra banda, el concepte de refracció es defineix com el canvi de direcció i velocitat d'una ona quan aquesta canvia de medi. En altres paraules, la refracció és la desviació que sofreix una ona al canviar de medi de propagació. Aquest fet té lloc a causa del canvi d'índex de refracció, ja que la velocitat de propagació d'una ona no és la mateixa, i s'explica mitjançant la llei de Snell:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Fórmula 2}$$

Aquesta fórmula relaciona els diferents índexs de refracció amb l'angle amb què incideix l'ona sobre el segon medi ( $\theta_1$ ) i amb l'angle de refracció, l'angle que defineix la direcció de l'ona en canviar d'espai ( $\theta_2$ ). Així doncs, el fenomen de refracció únicament es produeix quan hi ha un canvi de medi, conseqüentment un canvi en l'índex de refracció i en la velocitat de propagació, i quan l'ona no incideix perpendicularment sobre el segon medi o amb un angle major a l'angle crític (el que produeix una reflexió total, és a dir, no hi ha refracció).



**Figura 16**

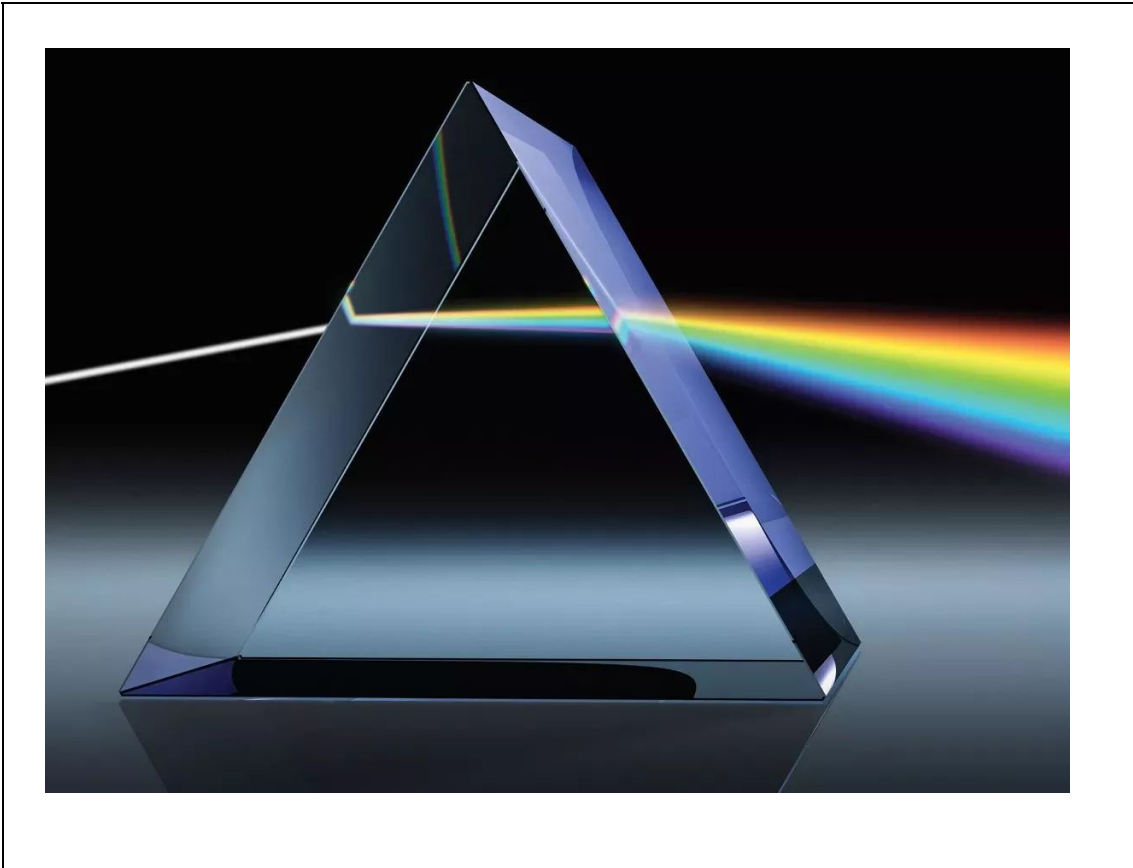
En aquesta imatge es pot observar la reflexió que sofreixen les ones en canviar de medi segons l'angle d'incidència amb el qual penetren. (R-32)

### c. Dispersió

La dispersió és un fenomen que experimenten les ones en la seva propagació a través d'un medi pel fet que aquesta depèn de la freqüència de l'ona.

Anteriorment he presentat que la velocitat de la llum en el buit és sempre constant independentment de la longitud d'ona que aquesta tingui, però en altres medis cal tenir present que la longitud d'ona determina la velocitat. Per tant, la longitud d'ona també influeix en l'índex de refracció d'un medi. Per exemple, la propagació de la llum al buit no experimenta dispersió, totes les freqüències es propaguen a la mateixa velocitat. En canvi, quan la llum es propaga per un determinat medi, com en seria l'aigua o el vidre, cada freqüència es propaga a una velocitat diferent. Això té efectes sobre l'índex de refracció i es pot experimentar quan observem l'arc de Sant Martí on la llum blanca es descompon amb les diferents longituds d'ona en travessar una gota d'aigua (fórmula 1).

Les diverses longituds d'ona o freqüències amb els diferents angles de refracció donaran lloc als colors que componen el feix de llum blanca. La longitud d'ona més curta dona lloc al color violet, mentre que la més llarga origina un color vermellós.

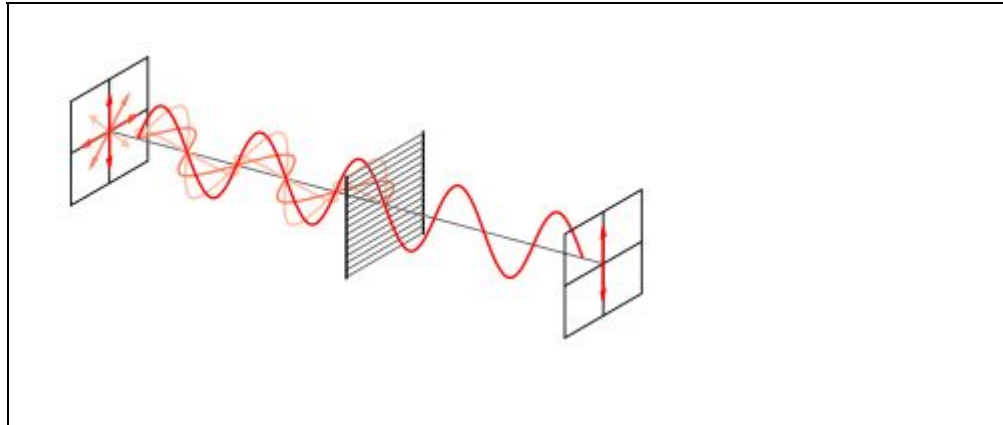


**Figura 17**

Aquesta figura representa el fenomen de la dispersió de la llum, on es pot observar com la llum blanca, en canviar de medi, es dispersa en diferents ones les quals corresponen a diferents longituds d'ona i, conseqüentment, mostren diversos colors. (R-33)

#### **d. Polarització**

La polarització és un fenomen que només es manifesta en aquelles ones on la pertorbació es propaga perpendicularment a la propagació de l'ona mateixa. Aquesta pertorbació pot variar en infinites direccions tal com mostra la figura 18. Es diu que una ona està polaritzada quan presenta una única direcció de pertorbació (figura 18). El pla de vibració o pertorbació d'una ona polaritzada es pot veure modificat quan aquesta travessa medis amb diferents propietats. Aquest efecte el veurem més endavant en el punt 5 del treball.



**Figura 18**

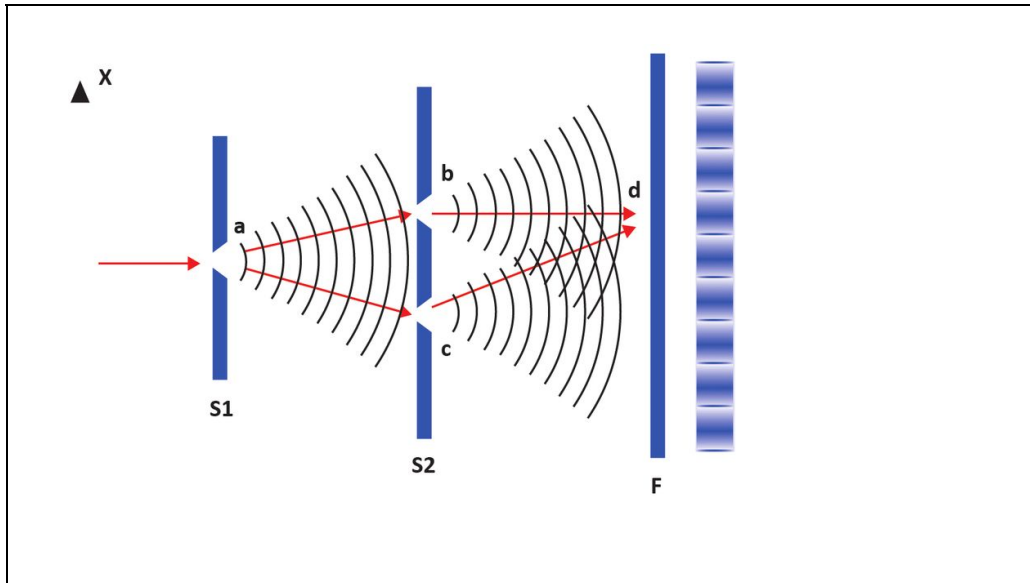
Aquesta figura mostra el procés que sofreix una ona al ser polaritzada, és a dir, l'ona passa de desplaçar-se en infinites direccions a desplaçar-se en una de sola. (R-34)

### e. Interferència i Difracció

Gràcies a científics, com Huygens i Young, es va declarar que, definitivament, la llum era una ona i no un feix de partícules.

La difracció és el fenomen en el qual unes ones d'una certa longitud d'ona, passen per un forat amb una longitud d'ona igual o similar a la de les ones anteriorment emeses. En conseqüència, tots els punts del forat o orifici són nous emissors de llum on tindran lloc interferències i, a partir d'aquí, obtindrem, en el material on s'estigui observant el fenomen, parts en les quals es pot observar llum i parts on no se n'observa a causa de les interferències que tenen lloc, és a dir, obtindrem el que s'anomena com a difracció. Si prenem la llum visible com a exemple, la longitud d'ona del forat a travessar hauria de ser d'uns 400-780 nm per tal que el fenomen tingués lloc. En canvi, si el forat no fos d'una longitud d'ona similar, és a dir, que tingués unes dimensions majors o menors, les ones no experimentarien cap mena de desviació.



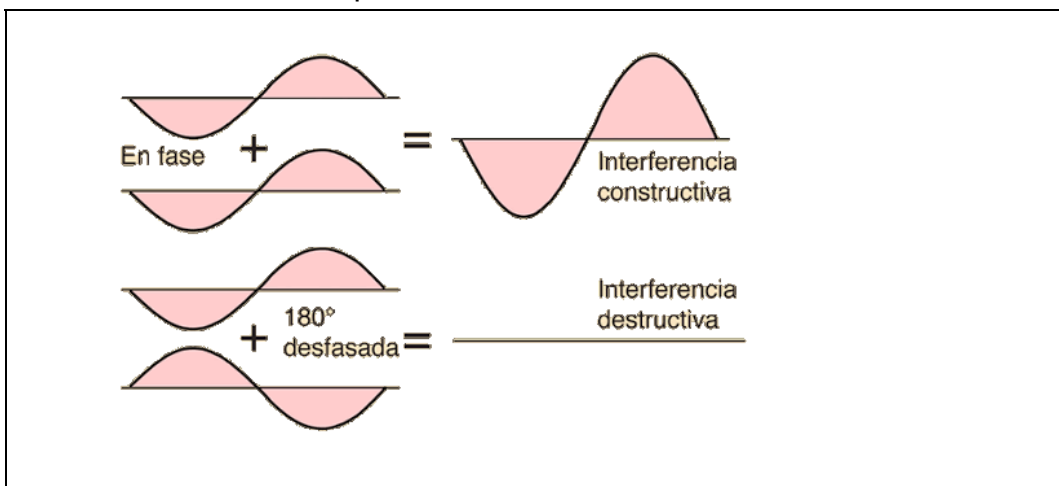


**Figura 19**

Figura que representa el fenomen de la difracció de la llum, plantejat per científics com Huygens. (R-35)

Una interferència és la superposició de dues o més ones en un punt de l'espai. Les interferències tenen lloc quan s'està propagant més d'una ona i aquestes es creuen, és a dir, interfereixen. Hi ha dos tipus d'interferències (figura 20):

- Constructiva: en la qual les ones que es combinen estan en el mateix estat de vibració. L'amplitud de l'ona resultant és major a la de les ones que produeixen la interferència.
- Destructiva: on l'amplitud de l'ona obtinguda és menor a la de les ones combinades, és a dir, les ones que es creuen estan en un estat d'excitació diferent. Per tant, aquestes dues poden minimitzar la intensitat o energia de l'ona resultant i fins i tot poden arribar a destruir-se entre elles mateixes.

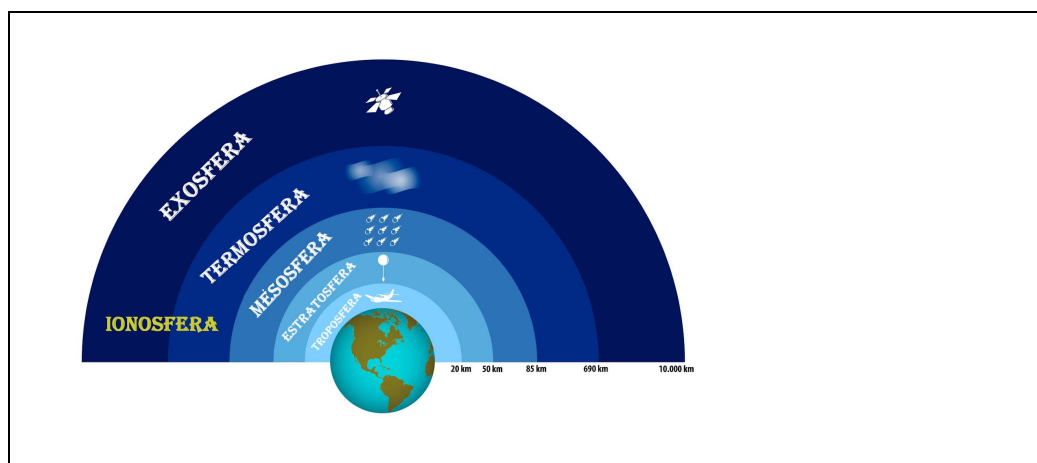


**Figura 20**

Imatge que mostra les diferents interferències entre ones segons en quin fase es troben aquestes. (R-36)

## 5. LA IONOSFERA

La ionosfera és la capa de l'atmosfera que se situa entre els 60 km i els 2000 km d'altura aproximadament. Aquesta es caracteritza per estar ionitzada, és a dir, conté electrons i ions lliures. El terme ionització fa referència al fet que la capa presenta els seus elements en forma d'ions, és a dir, que els elements que la conformen estan carregats elèctricament. Malgrat tot, el seu grau d'ionització és baix, aproximadament, d'un 1% del total dels elements. El fet que en la ionosfera hi hagi càrregues lliures, fa que tingui capacitat de modificar la propagació de les ones EM.



**Figura 21**

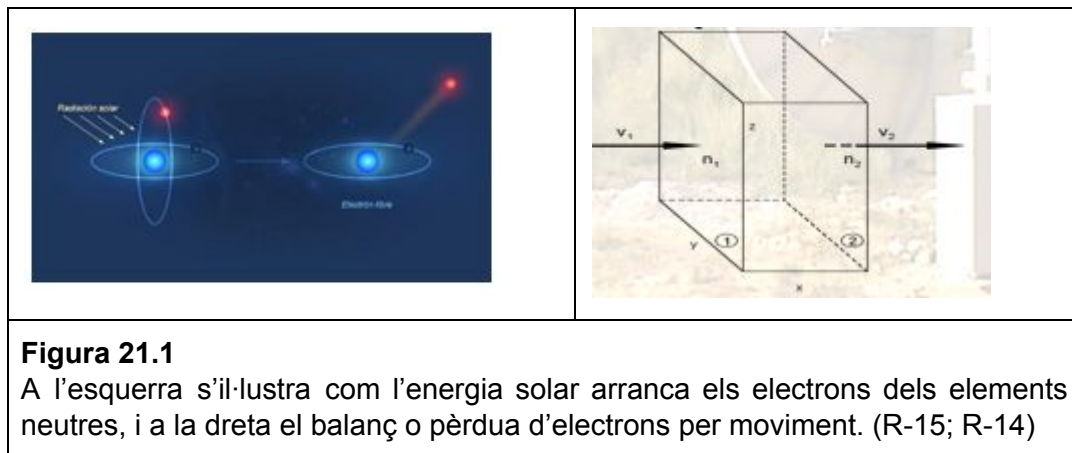
Aquesta figura mostra les diferents capes que conformen l'atmosfera terrestre i, també exposa dues capes que inclou la ionosfera. (R-37)

### a. Formació de la ionosfera: Teoria de Chapman

La ionosfera la componen  $N_2$ ,  $O_2$  i  $O$  ionitzats. La ionització d'aquests gasos s'ha produït a partir de l'energia provinent de la radiació solar (raigs ultraviolats) i dels raigs X que penetren en l'atmosfera.

L'energia de la radiació solar, en xocar contra els elements de l'atmosfera (àtoms i partícules neutres), és absorbida per aquests i arrenca els electrons dels elements neutres, generant ions positius i electrons lliures. Els ions i electrons reaccionen entre ells i amb altres elements neutres recombinant-se, generant altres elements neutres i altres ions. A més a més, de la mateixa manera que en l'atmosfera, en la ionosfera hi ha vents que actuen de diferent manera per als elements neutres que per als ions (R-2). Tots aquests fenòmens, producció d'electrons per radiació, pèrdua per recombinació i per moviment, estan en equilibri. En aquestes condicions d'equilibri, es pot representar matemàticament la quantitat d'electrons per unitat de volum en funció del temps mitjançant pel qual es coneix com l'Equació de la continuïtat (fórmula 3).

$$\frac{\delta N}{\delta t} = q - L - m \quad \text{Fórmula 3}$$



**Figura 21.1**

A l'esquerra s'il·lustra com l'energia solar arranca els electrons dels elements neutres, i a la dreta el balanç o pèrdua d'electrons per moviment. (R-15; R-14)

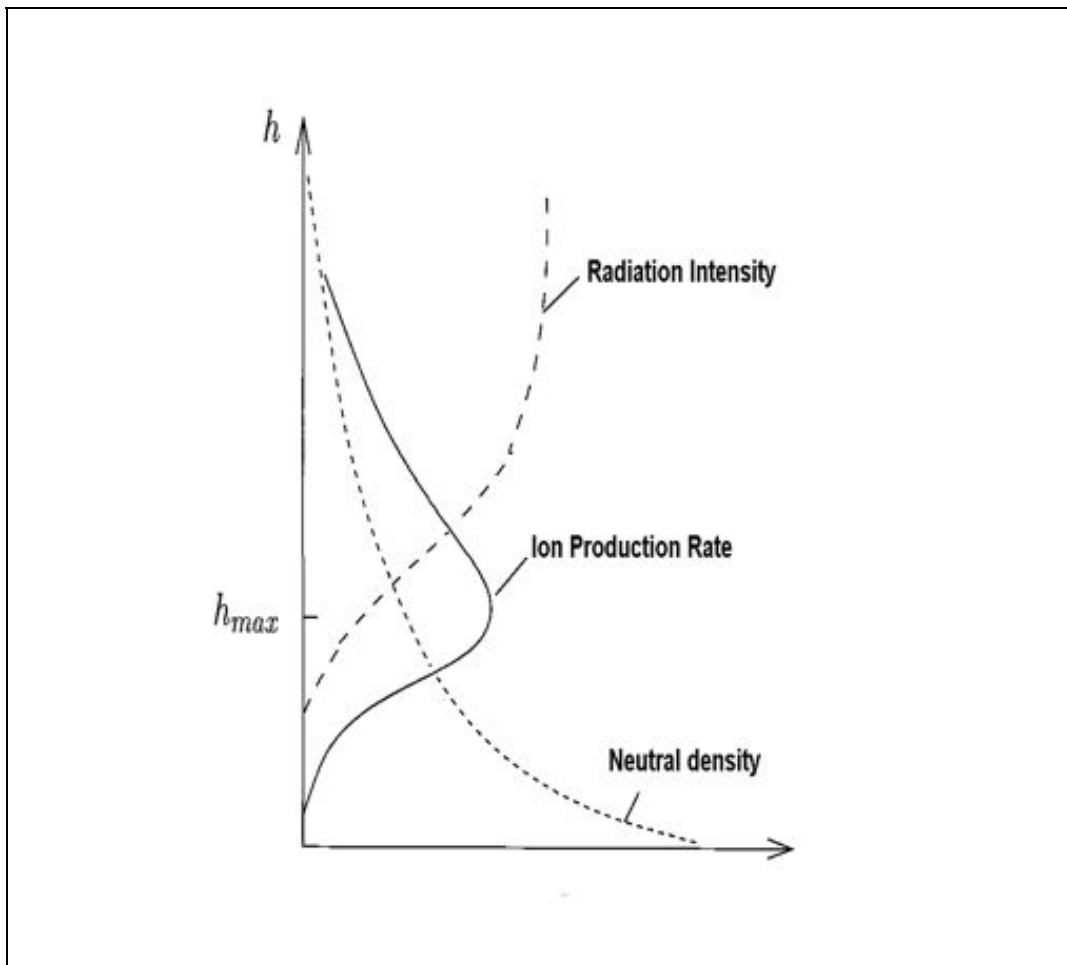
En aquesta equació (fórmula 3),  $N$  és la densitat electrònica,  $q$  la producció per radiació,  $L$  els processos de pèrdua de ions per recombinació i  $m$  significa la pèrdua per moviment.

La ionosfera és una capa que la seva densitat varia amb l'altitud. Aquest fet és degut a la disminució de la concentració de gasos susceptibles de ser ionitzats en l'atmosfera ( $n$ ) i, també, a l'augment de la intensitat de la radiació ( $I$ ) en augmentar l'altitud. Per tant, hi haurà una altura a la qual correspon un màxim d'ionització, que a la vegada genera un màxim de densitat electrònica.

La Teoria de Chapman és un dels models més emprats per explicar la formació de la ionosfera (figura 22). Aquesta considera que la producció de parells ió-electró ( $q$ ) és el resultat del producte de quatre factors: la intensitat ionitzant,  $I$ ; la concentració d'àtoms/molècules que es poden ionitzar,  $n$ ; la capacitat d'absorció d'energia d'un àtom/molècula,  $\sigma$ ; i la fracció d'energia absorbida que produeix ionització,  $\eta$  (fórmula 4).

$$q = \eta \cdot \sigma \cdot n \cdot I \quad \text{Fórmula 4}$$

$\eta$  depèn de l'angle d'incidència de la radiació solar ionitzant. D'aquesta manera, com més elevada sigui la posició del Sol, més elevada serà  $\eta$ . Al seu torn,  $I$  depèn de l'activitat solar. Aquesta equació es coneix com l'equació de producció de Chapman i té en compte les variacions regulars de la ionosfera: diürna, estacional, amb la posició geogràfica i amb l'activitat solar. Amb aquesta equació el científic Chapman acabaria desenvolupant una formulació nova que permetria modelar l'estructura de la capa ionosfèrica en capes i com aquesta varia amb el temps (figura 23).

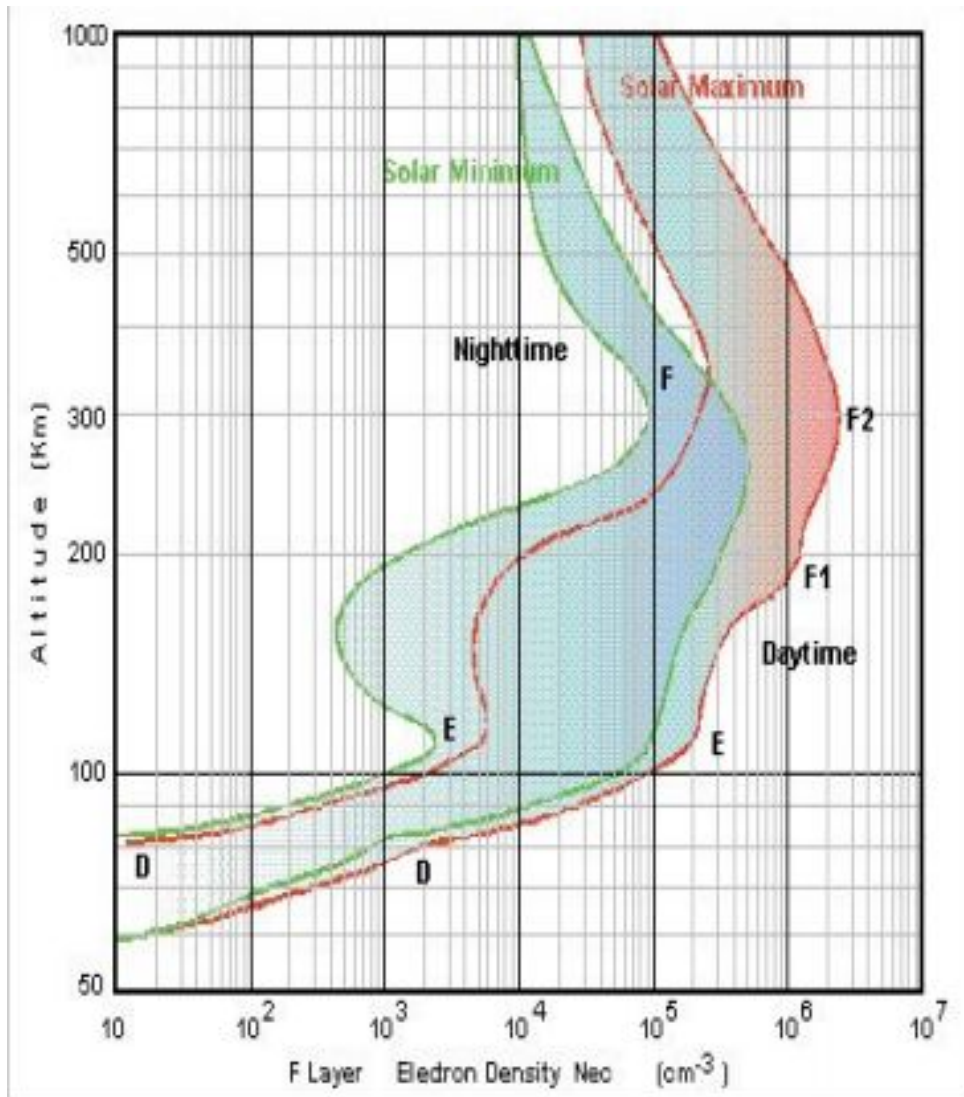


**Figura 22**

En aquesta imatge es pot observar com augmenta la intensitat de la radiació en l'altura, com hi ha una altura concreta on la producció d'ions és màxima i, també, com varia la densitat electrònica amb l'altitud, contra menys altura, menys ions. (R-15)

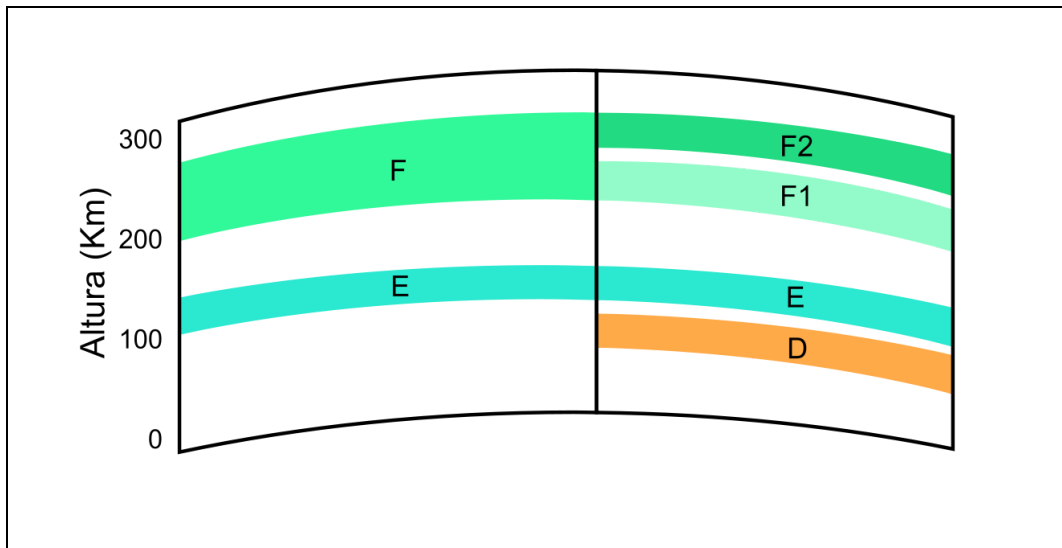
A més a més de les variacions regulars i simples de representar matemàticament, la ionosfera presenta altres variacions transitòries més complexes de modelar que s'han anat coneixent a mesura que ha anat avançant la capacitat d'observació. Aquestes variacions transitòries provoquen irregularitats en la ionosfera les quals algunes d'elles seran objecte d'aquest treball.

També cal mencionar que les diferents tècniques d'observació han permès conèixer l'estructura vertical de la ionosfera i la seva divisió en capes (figura 24), cada una d'elles caracteritzada pel seu màxim de densitat electrònica (figura 23), confirmant els models teòrics. Conseqüentment, es va dividir la capa en diferents regions: D, E i F (figura 24).



**Figura 23**

Aquesta figura representa les variacions de la densitat electrònica en l'altura. Les diferents ombres assignades a cada perfil representen les condicions de nit i de dia així com diferents nivells de radiació solar en aquesta. D'una banda s'observa que, durant el dia hi ha més ionització que durant la nit i com més activitat solar, també hi ha més densitat electrònica. (R-15)



**Figura 24**

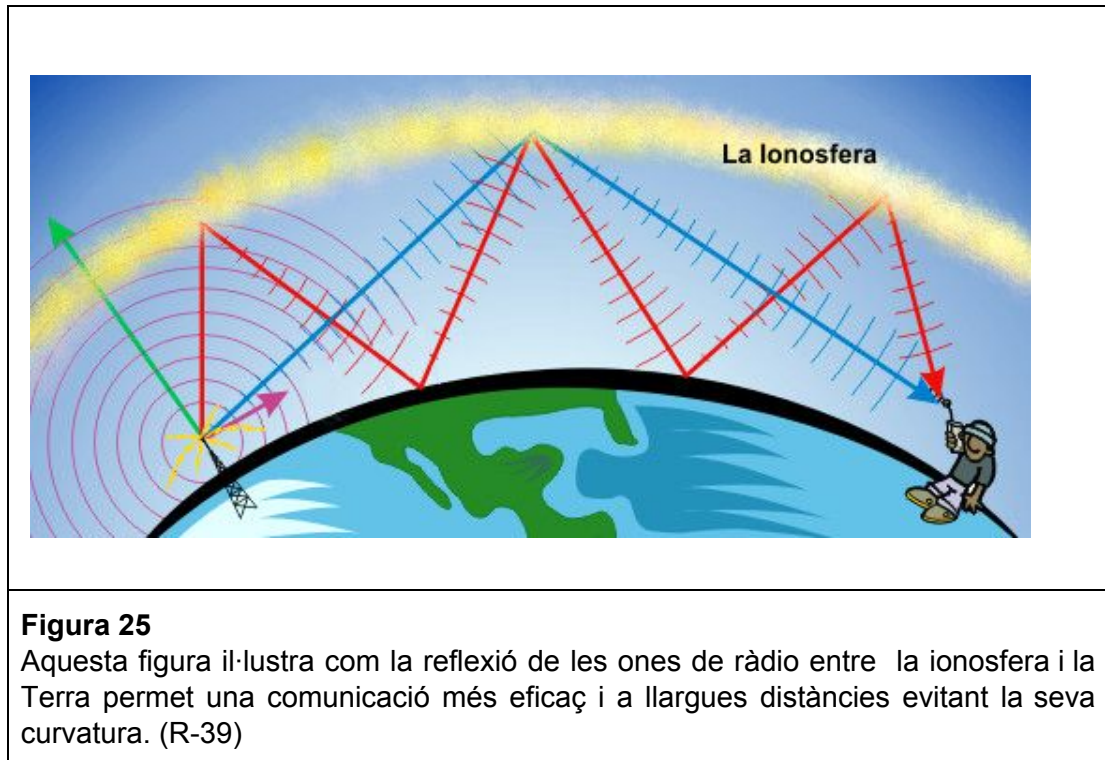
En aquesta imatge es mostren les diferents capes i regions que conformen la ionosfera i la seva distribució. Durant la nit (esquerra) només s'aprecien dues capes i durant el dia (dreta) l'estructura és més complexa apareixent noves regions, cada una d'elles està caracteritzada pel seu màxim de densitat (Fig. 23). (R-38)

Aquestes capes estan ordenades de menor a major altura del pic de densitat electrònica.

### **b. Propietats**

La ionosfera és una capa bastant peculiar, ja que el fet de tenir càrregues lliures permet que la ionosfera tingui la capacitat de modificar la propagació de les ones EM. Depenent de la freqüència de les ones EM, la ionosfera pot desviar la seva direcció de propagació, inclús reflectir-les per complet, com passa en les ones EM de la banda de ràdio. Així, malgrat que les ones EM de ràdio es propaguen en línia recta, podem utilitzar la ionosfera per enviar informació mitjançant aquestes ones entre dos punts molt distants de la Terra, evitant la seva curvatura (figura 25). De la mateixa manera que la modificació de la propagació de les ones per la ionosfera aporta beneficis a l'hora de comunicar-nos, també provoca interferències i perturbacions de les ones EM de ràdio. Aquest inconvenient és degut als bruscs canvis de densitat electrònica que tenen lloc en la ionosfera que, malauradament, canvien completament la reflexió de l'ona i, com a resultat, l'arribada d'aquesta a la superfície terrestre. Per tant, cal tenir present que la ionosfera ens permet una millor comunicació, però, independentment, també presenta variacions que poden alterar-la. Un exemple de perturbacions i interferències en les ones EM de ràdio que afecta la comunicació és el que la ionosfera pot causar als sistemes de comunicació per satèl·lit. En particular en el sistema GPS (de l'anglès: "ground positioning system", traduït: sistema de posicionament terrestre). En el cas del GPS l'emissor es

troba fora de la superfície terrestre (als satèl·lits) i el senyal de ràdio ha de travessar tota la ionosfera. El sistema GPS permet determinar la posició d'un receptor a terra, però quan la ionosfera està pertorbada, aquest posicionament pot resultar erroni, ja que l'arribada de l'ona des del satèl·lit al receptor no serà la desitjada i no podrà funcionar correctament.



**Figura 25**

Aquesta figura il·lustra com la reflexió de les ones de ràdio entre la ionosfera i la Terra permet una comunicació més eficaç i a llargues distàncies evitant la seva curvatura. (R-39)

Fent ús d'aquestes propietats podem extreure informació de la ionosfera com en seria saber la seva densitat electrònica en un punt. Contràriament, tenint en compte l'estat de la ionosfera podem determinar com aquesta afecta la propagació de les ones.

### c. Mètodes d'observació

Un dels mètodes més emprats per realitzar l'observació de la ionosfera és el sondejador ionosfèric. Aquest serà l'instrument, les dades del qual, em permetran realitzar la part pràctica d'aquest projecte.

El sondejador ionosfèric es basa en les propietats de la propagació de les ones electromagnètiques. La propagació de les ones EM depèn de la densitat electrònica que travessa i és diferent per a cada freqüència, la ionosfera té un caràcter dispersiu. Particularment, l'índex de refracció ( $n$ ) s'expressa d'acord amb la següent fórmula:

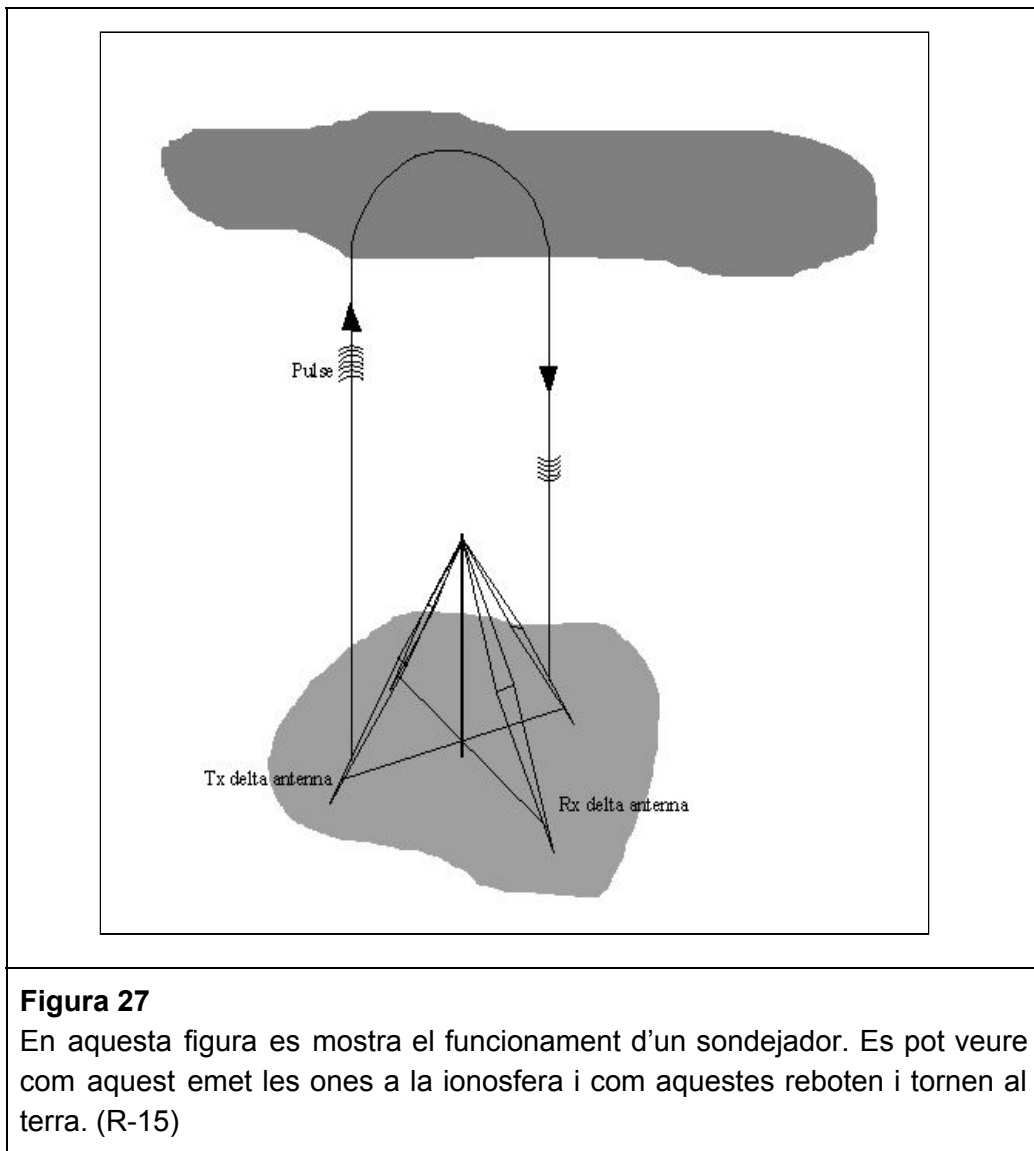
$$n = \sqrt{1 - c \cdot \frac{N}{\omega^2}} \quad \text{Fórmula 5}$$

On,  $c$  és la velocitat de propagació de la llum al buit ( $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ ),  $N$  equival a la densitat electrònica i  $\omega$  ( $\frac{2\pi}{T}$ ) és la freqüència angular de l'ona electromagnètica, i  $T$  és el període de l'ona .



El sondejador ionosfèric funciona de tal manera que emet ones de ràdio verticalment des de terra cap a la ionosfera a diferents freqüències ( d' $1 \cdot 10^6$  a  $30 \cdot 10^6$  Hz) i mesura el temps que tarda des de l'emissió fins a la recepció del rebot a la ionosfera, com il·lustra la figura 27. En aquesta banda de freqüències, la ionosfera pot provocar la reflexió total i comportar-se com un mirall amb la llum.

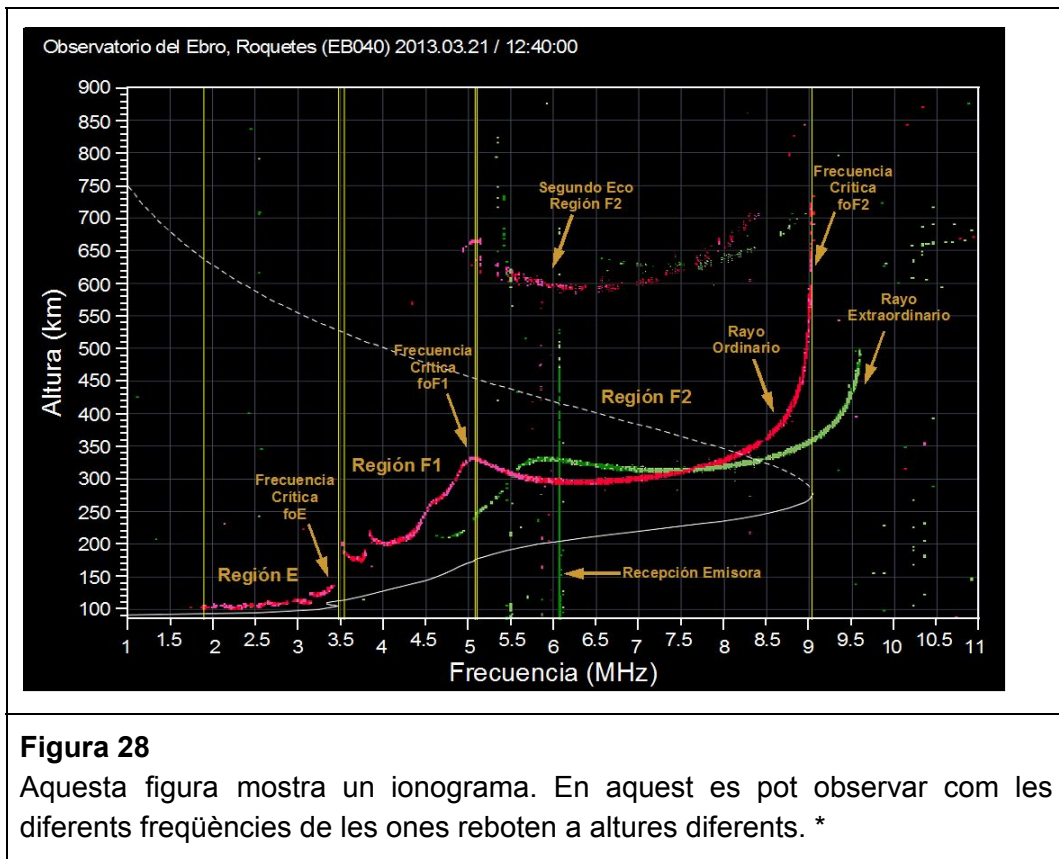




**Figura 27**

En aquesta figura es mostra el funcionament d'un sondejador. Es pot veure com aquest emet les ones a la ionosfera i com aquestes reboten i tornen al terra. (R-15)

El registre del sondejador ionosfèric, del qual s'extreuen les dades, es coneix com a ionograma. En el ionograma, es representa el temps que tarda cada freqüència des que s'emet fins que rebota i torna a terra. Aquest temps es converteix en l'altura on s'ha produït el rebot, assumint que la velocitat de propagació de l'ona equival a la velocitat de propagació de la llum,  $c$ . D'aquesta manera, un ionograma es una representació d'altures de reflexió (eix  $y$ ) en funció de la freqüència de l'ona de ràdio rebotada (eix  $x$ ), tal com mostra la figura 28.



**Figura 28**

Aquesta figura mostra un ionograma. En aquest es pot observar com les diferents freqüències de les ones reboten a altures diferents. \*

La figura 28, ens mostra un ionograma on la ionosfera està en condicions tranquil·les, ja que no s'observa dispersió de les traces de les reflexions, sinó que es veu una línia definida (traça de colors rogencs i verdosos). També es pot observar una línia blanca que ens indica l'altura real on s'ha produït la reflexió. Aquesta línia blanca correspon al perfil de densitat electrònica en l'altura, i la traça del ionograma fa referència a l'espai que recorren les ones suposant que es propaguen a la velocitat de la llum. La diferència entre l'altura real i l'altura de la traça és deguda al canvi de velocitat que sofreixen les ones de ràdio quan es propaguen en la ionosfera, és a dir, les ones es propaguen a una velocitat inferior a la velocitat de la llum. Amb els ionogrames podem conèixer com varia la densitat electrònica en l'altura fins al màxim de densitat, que determina la freqüència màxima que es pot reflectir (fórmula 6), també coneguda com a freqüència crítica.

El ionograma ens mostra dues traces, una de roja i una altra de verda. La línia roja correspon al feix d'ones reflectit amb polarització ordinària, mentre que la verda correspon al feix d'ones reflectit amb polarització extraordinària. Aquests efectes queden fora de l'abast d'aquest estudi, i n'hi ha prou en dir que són efectes del camp magnètic de la Terra sobre les ones EM en la banda de ràdio.

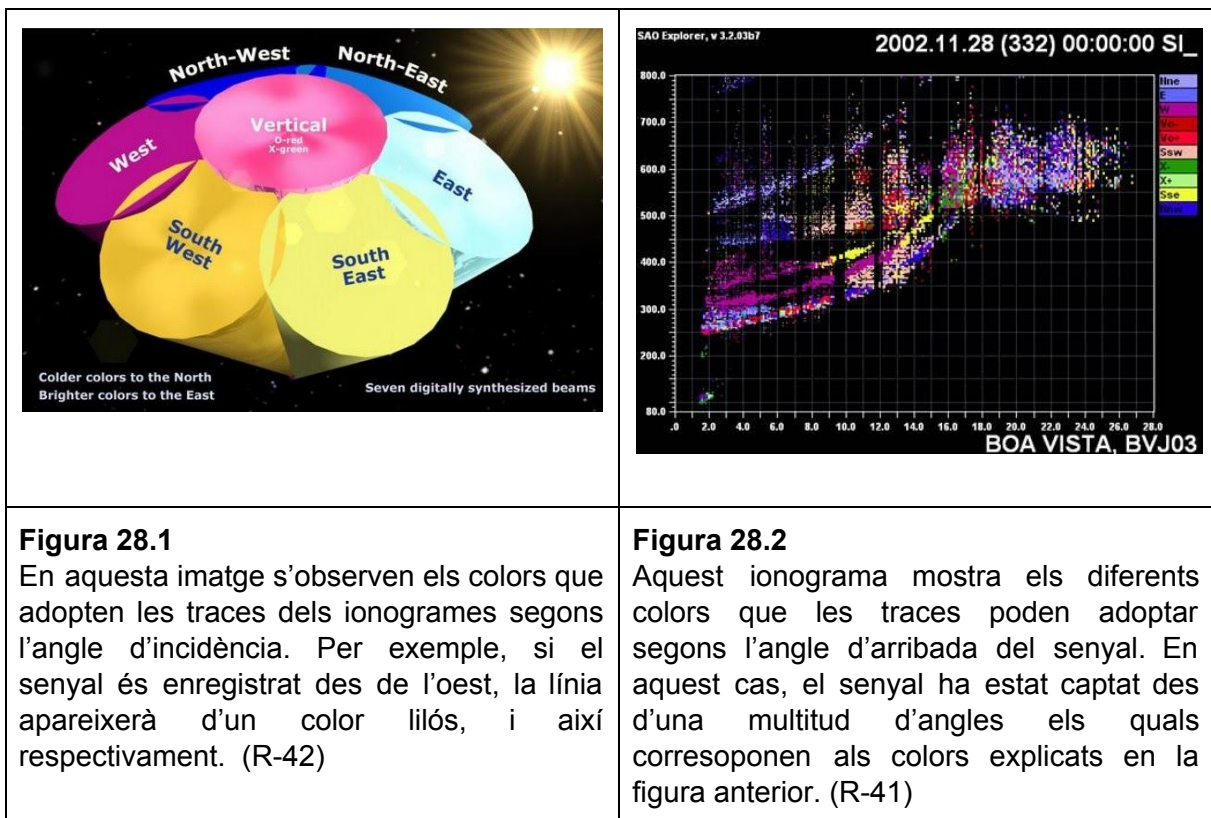
En el cas particular d'una reflexió total, i aplicant la llei de Snell, es pot deduir la següent relació entre la freqüència reflectida i la densitat electrònica:

$$N = \frac{(2\pi f)^2}{c} \quad \text{Fórmula 6}$$

On  $N$  és la densitat electrònica al punt de reflexió,  $f$  és la freqüència de l'ona reflectida i  $c$  és la velocitat de la llum al buit ( $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ ).

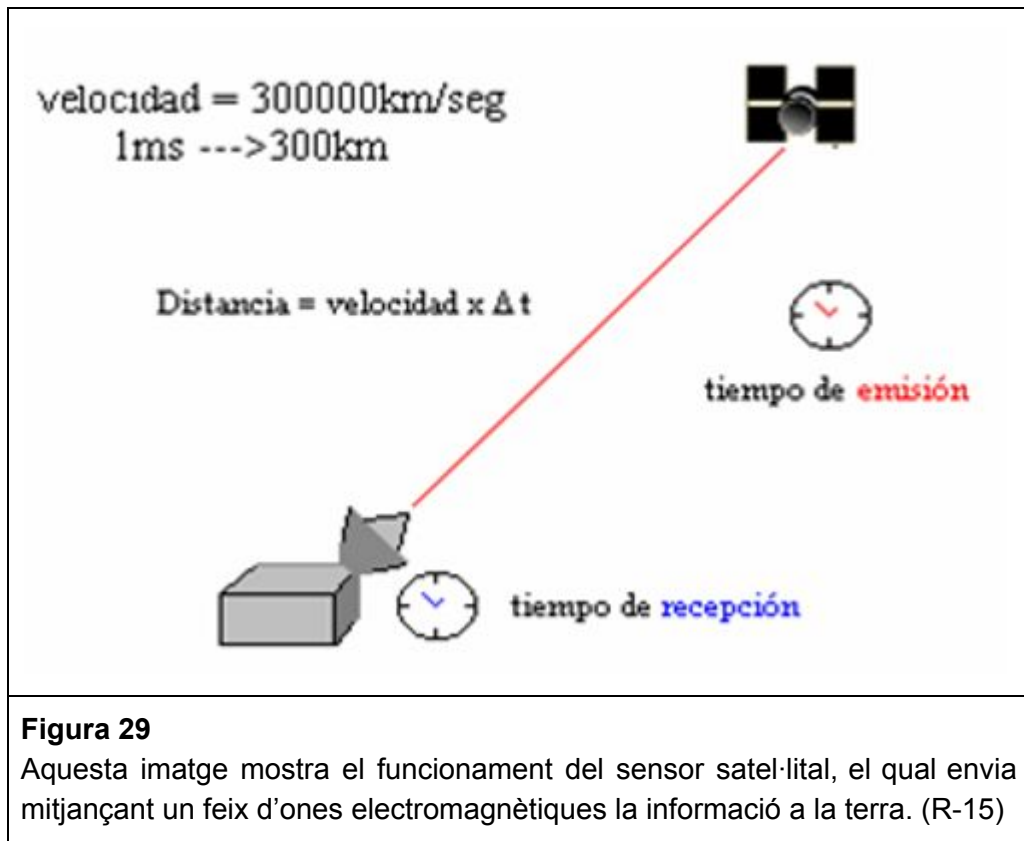
Per tant, el sondejador ionosfèric ens permet saber a quina altura es troba el punt de reflexió d'una freqüència determinada i quina densitat electrònica hi ha en aquell mateix punt. D'aquesta manera, podem conèixer si al llarg de la ionosfera hi ha canvis en la densitat electrònica. Així doncs, es poden localitzar les zones amb més densitat electrònica de la capa i, consegüentment, es pot tenir present les zones on la informació obtinguda pot haver estat distorsionada.

En els ionogrames, també, es pot observar una gamma de colors al llarg de la línia que relaciona la freqüència amb l'altitud (figura 28.2). Això és degut al fet que el sondejador ionosfèric és capaç de distingir els angles amb els quals el senyal arriba al sensor (figura 28.1), és a dir, observa una gran porció de l'espai per sobre seu, i depenent en quin angle s'hagi detectat el senyal, la traça mostrarà un color o un altre.



La figura 28.2, a diferència de la figura 28, il·lustra un ionograma pertorbat, tal com s'explicarà més endavant.

Un altre mètode d'observació de la ionosfera és mitjançant l'anàlisi del senyal de satèl·lits (Fig. 29).

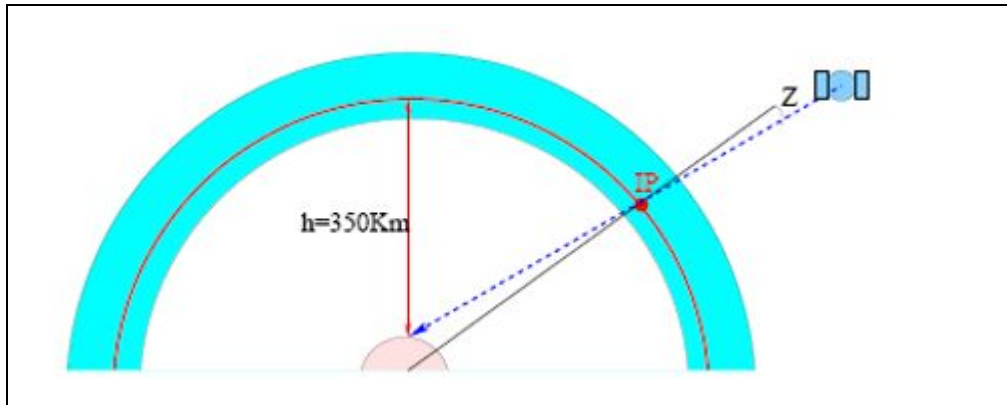


El temps de recepció des del satèl·lit a terra té una component lligada a la distància i una altra lligada al retard que afegeix la ionosfera a la propagació del senyal, entre altres. Aquest retard ionosfèric depèn de la freqüència i per a cada freqüència aquest és proporcional a la quantitat d'electrons que travessa en la seva propagació.

$$R_{If} = \frac{40,3}{f^2} \cdot I_0 \quad \text{Fórmula 7}$$

On  $R_{If}$  és el retard ionosfèric que sofreix el senyal amb freqüència ( $f$ ) i la  $I_0$  és la quantitat total d'electrons que travessa el senyal des del satèl·lit a terra.

A diferència dels sondejadors ionosfèrics, que varien la freqüència d'emissió, el senyal del satèl·lit utilitza unes freqüències constants i molt més elevades que les freqüències d'emissió dels sondejadors. Els sondejadors emeten en la banda dels megahertz ( $10^6$  Hz) i els satèl·lits emeten en la banda dels gigahertz ( $10^9$  Hz). També, a diferència dels sondejadors, que observen un volum de l'espai a sobre seu, els registres de satèl·lit proporcionen informació sobre la línia que connecta el satèl·lit amb el sensor receptor a terra (Figura 30).



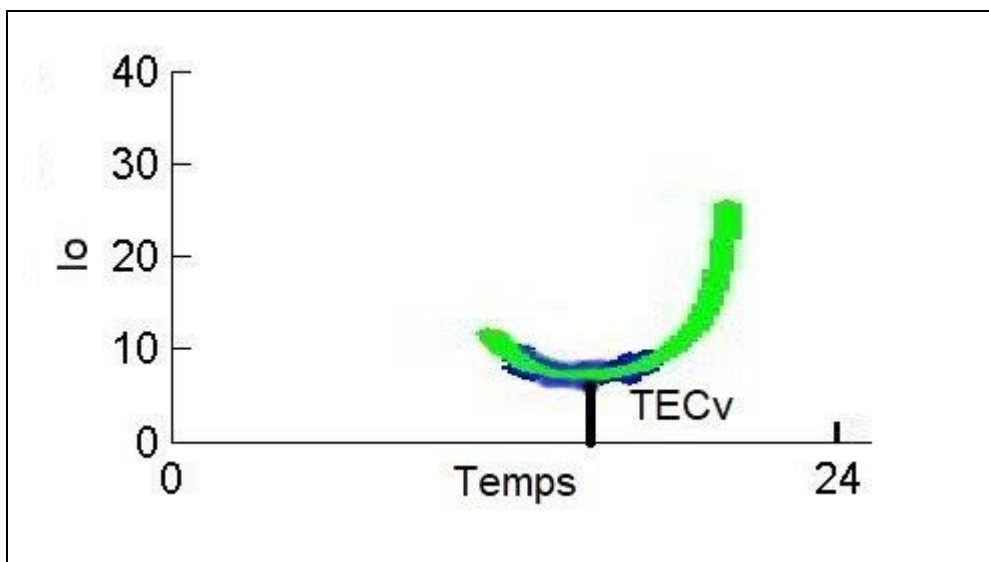
**Figura 30**

Aquesta imatge exposa les zones que travessen les ones emeses pel satèl·lit fins a arribar al punt de rebuda de la informació. En aquestes zones de la ionosfera hi poden haver perturbacions que distorsionen la propagació del senyal. (R-15)

Com hem citat anteriorment, aquesta  $I_0$  és proporcional al contingut total d'electrons (CTE) sobre la vertical del receptor, de manera que, assumint una simetria esfèrica es pot expressar matemàticament com:

$$I_0 = \frac{CTEv}{\sin\theta} \quad \text{Fórmula 8}$$

On CTEv és el contingut total d'electrons sobre la vertical i  $\theta$  és l'angle d'elevació del satèl·lit sobre l'horitzó. En suposat cas que el satèl·lit es trobi sobre la vertical,  $\theta$  és de  $90^\circ$ . El CTE es mesura amb TECUs, de l'anglès Total Electron Content Units, on cada TECU equival a  $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>.



**Figura 31**

Aquest gràfic representa la variació del contingut total d'electrons ( $I_0$ ) en funció del temps, en hores, on concretament el temps equival a diferents angles d'elevació del satèl·lit respecte el sensor (veure l'equació anterior).

\*

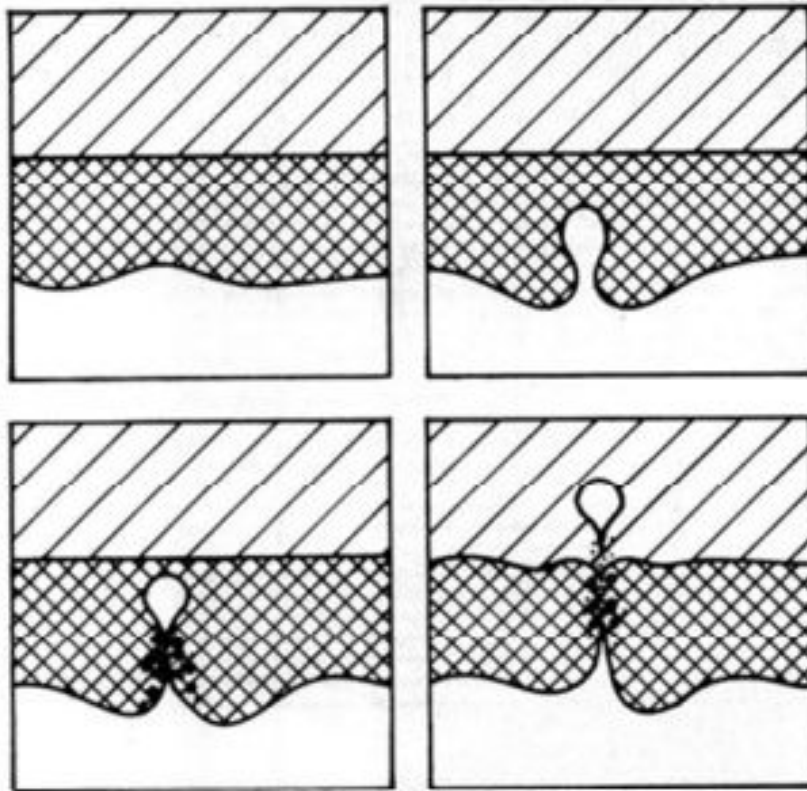
La figura 31 mostra la variació en el temps (o amb l'angle d'elevació) del contingut total d'electrons en la línia de visió entre el satèl·lit i el receptor. Aquesta variació acostuma a ser suau excepte quan el senyal travessa una irregularitat.

Cal tenir en compte que, com he indicat anteriorment, les ones de ràdio EM sofreixen un retard en propagar-se en la ionosfera respecte a la propagació en el buit, efecte que mostren tots dos mètodes d'observació. Aquest retard és degut al fet que la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques és menor que la de la velocitat de la llum, i depèn de la freqüència. Per tant, el retard observat en el sondejador serà diferent de l'observat en els satèl·lits. Aquesta diferència en el retard observat, és deguda al fet que els sistemes operen en freqüències diferents, però tots dos retards ens proporcionen informació de la ionosfera.

## **6. IRREGULARITATS IONOSFÈRIQUES: BOMBOLLES DE PLASMA.**

La ionosfera és una capa que té la peculiaritat de tenir càrregues lliures i és caracteritzada per la seva densitat electrònica. Aquesta densitat sol ser més o menys homogènia en el temps i l'espai, però de vegades manifesta inestabilitats i perturbacions transitòries. Les inestabilitats presents a la capa són majoritàriament generades per canvis bruscs en la densitat electrònica.

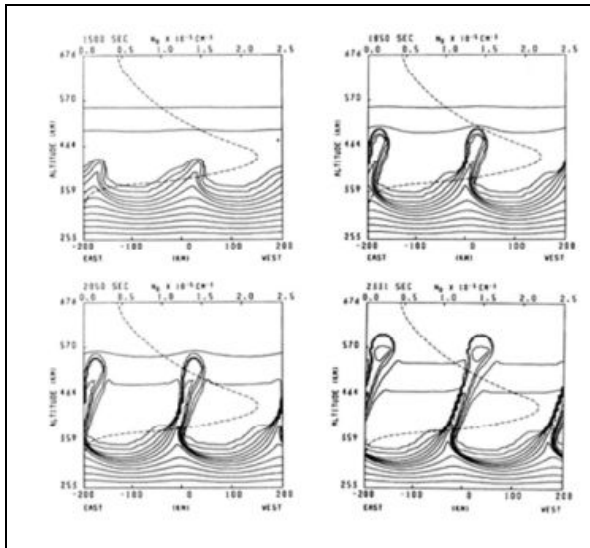
Les inestabilitats que seran estudiades en aquest treball són les anomenades *bombolles de plasma equatorial* (de l'anglès EPB). Aquestes bombolles són zones on la densitat electrònica és molt menor a la densitat de l'ambient que l'envolta. No entraré en el detall dels mecanismes físics que expliquen la generació de les EPBs, ja que no és l'objecte d'aquest estudi. Sobre aquest mecanisme simplement comentaré que les EPBs es creen quan, en aquestes regions de gran variació de densitat electrònica, es manifesten petites variacions del corrent elèctric en la ionosfera. Aquest fet provoca un desenvolupament de la irregularitat en la densitat electrònica i genera una bombolla de plasma, és a dir, la zona on la densitat electrònica és menor augmenta contínuament, i, a més a més, també provoca que aquesta ascendeixi verticalment fins a obtenir una zona independent.



**Figura 32**

Aquest és un esquema que representa la formació d'una EPBs. En aquest es pot observar la zona de la ionosfera on varia la densitat i com aquesta variació produeix un espai aïllat, el qual ascendeix verticalment fins generar una zona independent i donar lloc a la bombolla de plasma equatorial. (R-12)

L'any 1956 el científic Dungey va proposar que les inestabilitats de Rayleigh-Taylor són les que produeixen les irregularitats, és a dir, les bombolles de plasma. Les inestabilitats Rayleigh-Taylor són produïdes quan un fluid de baixa densitat es troba amb un altre amb una densitat molt major. Aquest tipus d'inestabilitat també la podem trobar a l'atmosfera i la veiem reflexada en els núvols. En aquest cas, però, s'anomena inestabilitat Kelvin-Helmholtz i, altrament, aquestes són provocades o bé per la intervenció d'un fluid en un altre de continu o per la gran diferència de velocitat entre dos fluids. (R-12)



**Figura 33**

Inestabilitats Rayleigh-Taylor les quals causen les EPBs en la ionosfera. La imatge descriu la formació de les bombolles de plasma equatorial. (R-12)



**Figura 34**

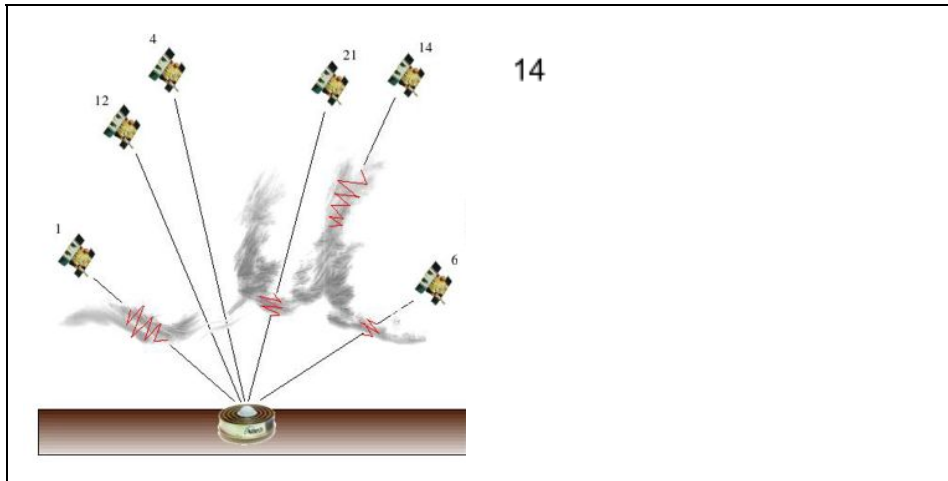
Inestabilitats Kelvin-Helmholtz les quals causen irregularitats similars a les EPBs, però en l'atmosfera. La imatge mostra la forma que adopten els núvols en haver aquestes pertorbacions presents en l'ambient atmosfèric. (R-40)

Aquestes irregularitats causades per les inestabilitats Rayleigh-Taylor poden ser captades tant per les observacions dels sondejadors ionosfèrics com per les dels satèl·lits.

D'una banda, en el cas dels satèl·lits les EPBs provoquen una disminució del contingut total d'electrons en l'interval de temps que el senyal entre el satèl·lit i el receptor travessa aquesta pertorbació. La figura 35 il·lustra com a mesura que el senyal dels satèl·lits travessa les irregularitats (EPBs) aquest es veu distorsionat.

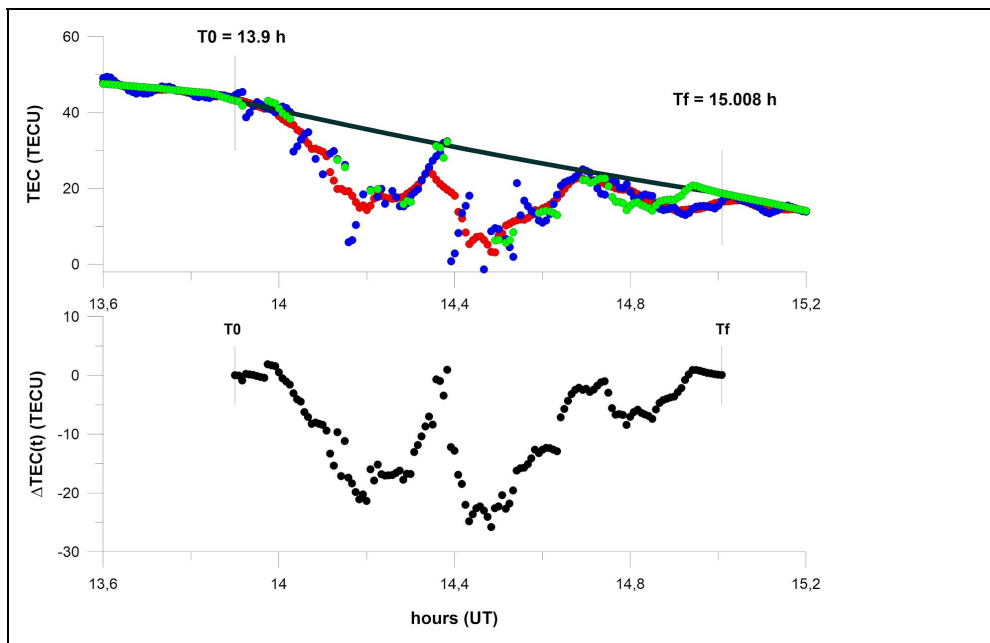
El gràfic de sota (figura 36) representa la pertorbació en el CTE causada per una bombolla de plasma. En aquests casos s'observen disminucions abruptes en el contingut total d'electrons (CTE) respecte a la variació esperada tal com mostra la figura 36. Els punts amb els colors verd, blau i roig són les dades del CTE que s'extreuen del satèl·lit en presència d'una EPBs. La línia grisosa representa el CTE de l'ambient que envolta l'EPBs en condicions tranquil·les.





**Figura 35**

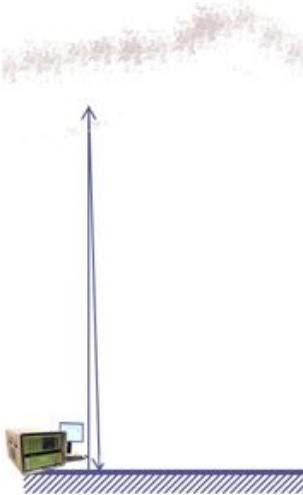
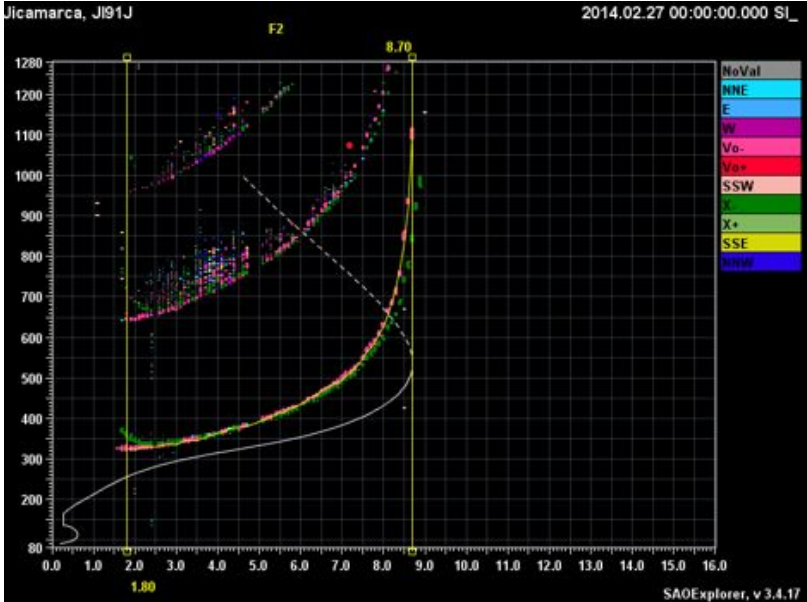
Aquesta figura mostra l'arribada de la informació provinent de satèl·lits. Es pot observar com aquesta informació pot arribar distorsionada si atravesa zones que presenten perturbacions o, simplement, com en el satèl·lit n°14, que la informació no arribi al destinatari degut a les EPBs. (R-13)



**Figura 36**

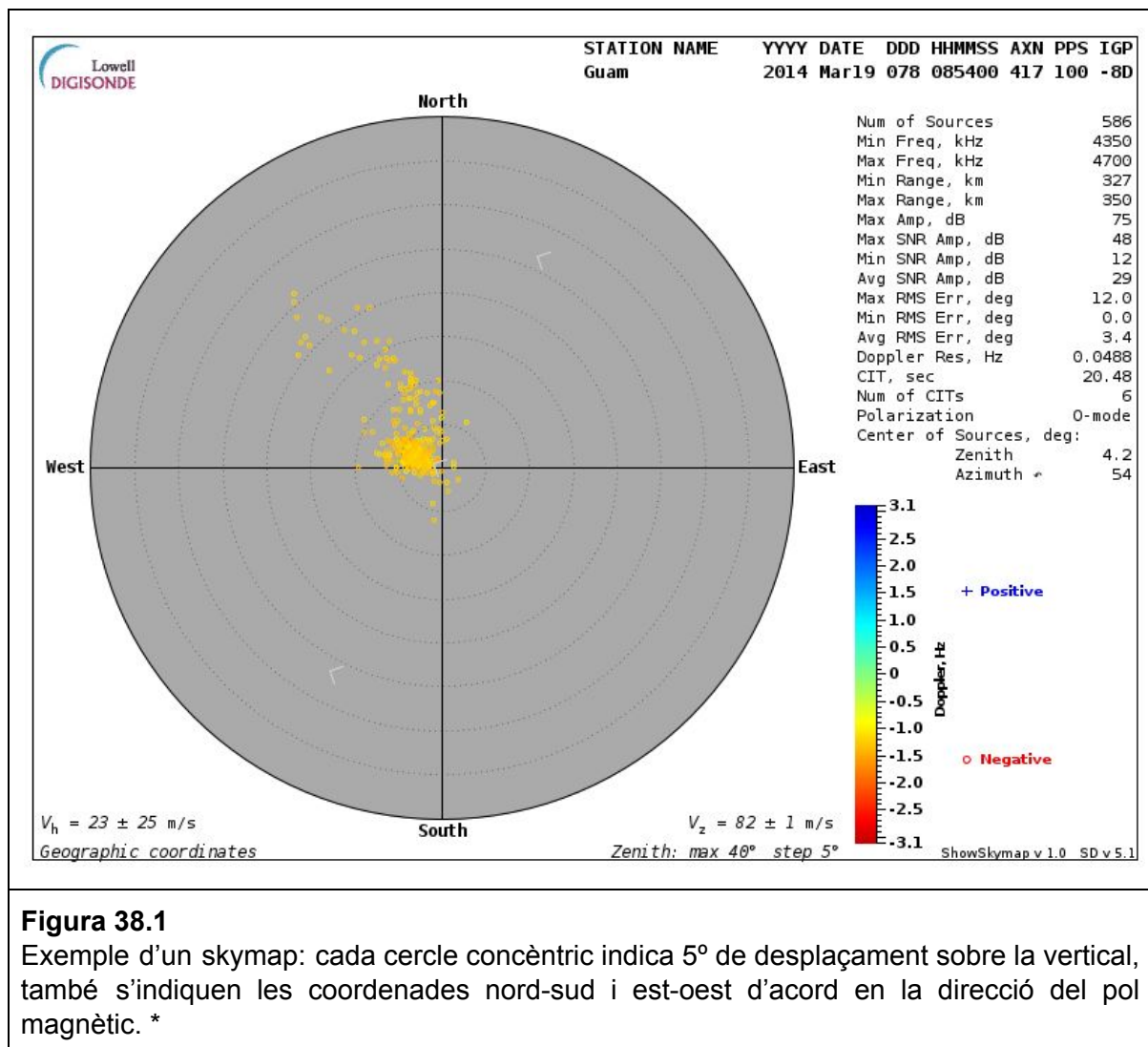
Pertorbació detectada en el CTE conseqüència d'una EPBs on s'indica el temps inicial i final i de la qual es pot deduir la pertorbació màxima (-25 TECU) i el temps en què es dona aquesta (14,5 h). Anteriorment a aquesta pertorbació n'hi ha una altra (14,2 h), però no de la mateixa intensitat pel fet que la seva pertorbació màxima és de -20 TECU. A més a més, el sistema considera totes dues perturbacions com una de sola. \*

D'altra banda, les observacions dels sondejadors ionosfèrics, en altres paraules, els ionogrames, són molt diferents quan sobre la vertical hi ha les bombolles de plasma respecte quan no n'hi ha. Per exemple, un ionograma enregistrat en un estat tranquil s'observa com indica la figura 38. Els rebots del senyal a una freqüència determinada, estan concentrats també a una altura determinada i la traça és molt fina.

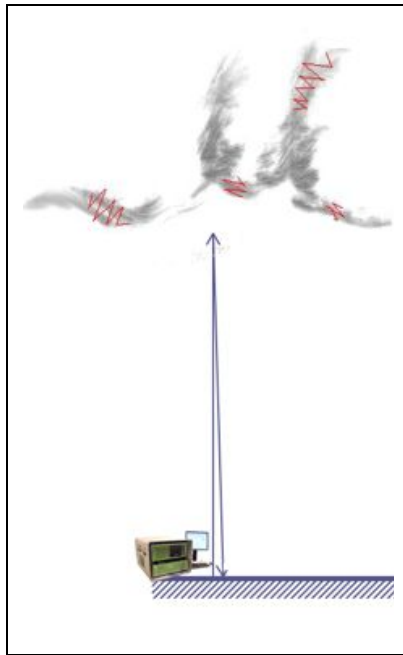
	
<p><b>Figura 37</b> Aquesta imatge mostra el funcionament d'un sondejador, com aquest envia el senyal a la ionosfera i com aquest rebota i torna a la superfície terrestre. En aquest cas, podem observar que la informació no travessa cap zona pertorbada. (R-13)</p>	<p><b>Figura 38</b> Aquest és un ionograma en estat tranquil, conseqüentment, on les ones electromagnètiques no han tingut contacte amb cap irregularitat. Aquest fet el podem deduir, ja que en el ionograma les freqüències de les ones es concentren en una única altura i, per tant, no ha sofert dispersió. En els ionogrames, l'eix horitzontal (x) correspon a la freqüència de les ones (Hz), mentre que l'eix vertical (y) correspon a l'altura a la qual es produeix la reflexió de les ones (km). (R-13)</p>

Els sondejadors també ens proporcionen altres tipus de registres on es pot observar de quina regió sobre l'emissor provenen els rebots del senyal, gràcies a la possibilitat que tenen els sondejadors de conèixer l'angle en que arriba el senyal. Aquests registres es coneixen com a mapes del cel (de l'anglès: "skymap", figura 38.1). La imatge 38.1 representa un exemple de "skymap" quan la ionosfera està en condicions tranquil·les. El "skymap" és una representació en coordenades polars on

el radi indica la distància del punt de rebot respecte de la vertical (cercles concèntrics o angle zenital) i l'angle del diagrama polar indica la direcció respecte del nord magnètic (Azimuth). En el cas ideal que la ionosfera fos un reflector perfecte, tots els rebots provindrien d'un mateix punt o regió estreta, i si no presentés cap mena d'inclinació respecte de la superfície de la Terra, tots els rebots provindrien del centre del cercle. Els colors dels punts no són importants per a l'estudi i no entraré en detall, simplement comentar que indiquen el desplaçament Doppler del senyal. Així el skymap de la figura 38.1 mostra que la majoria de punts provenen d'una regió concentrada dins de l'angle de 5° zenitals i lleugerament inclinada en el sector nord-oest, indicant que les condicions ionosfèriques són tranquil·les.

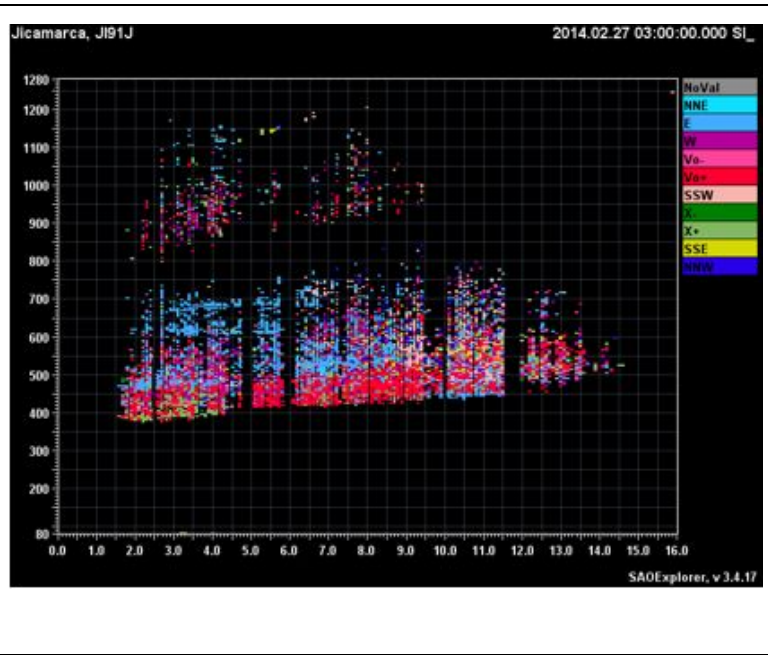


En canvi, en un registre en condicions pertorbades, com les generades per una EPBs, el senyal experimenta múltiples reflexions a la cavitat i rebota de tal manera que aparentment prové de diferents altituds i direccions. La figura 40 mostra un exemple de ionograma en condicions pertorbades afectat per una EPBs.



**Figura 39**

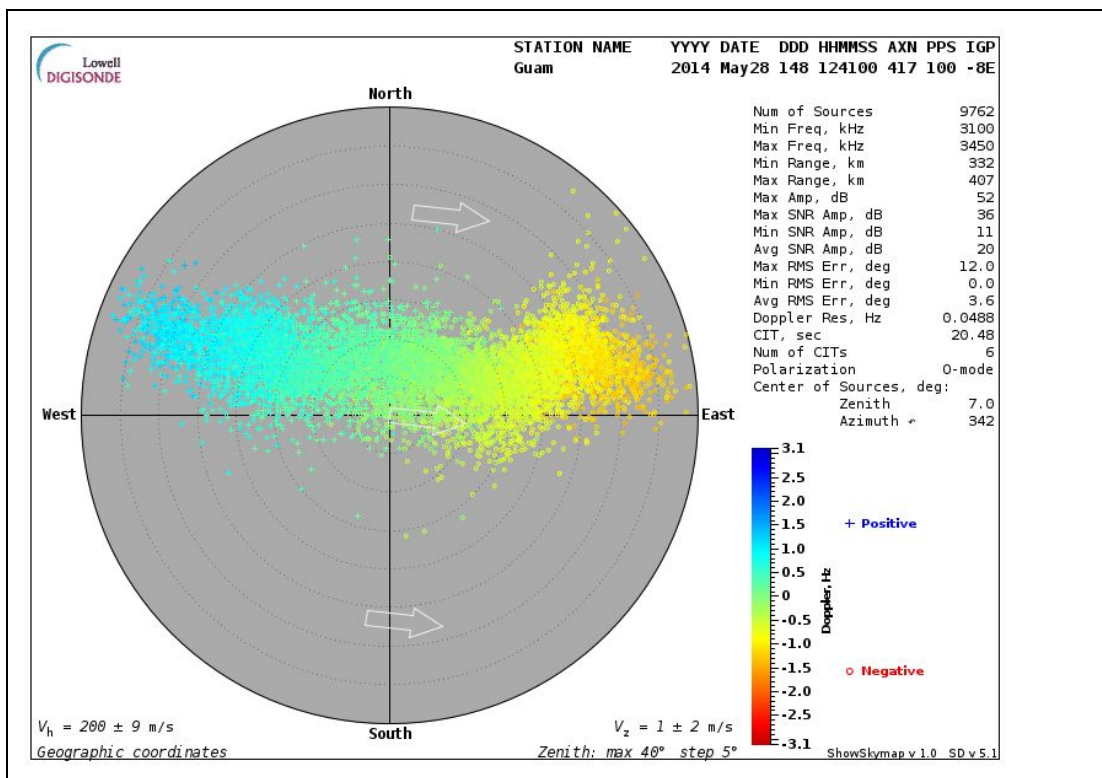
En aquesta imatge observem el mateix funcionament del sondejador que en la figura 37, però en aquest cas les ones travessen zones amb presència d'EPBs i, conseqüentment, el ionograma presenta irregularitats. (R-13)



**Figura 40**

En aquest ionograma podem observar què causen les irregularitats presents en la ionosfera. S'observa que a una mateixa freqüència li corresponen diverses altures, és a dir, hi ha una certa dispersió. La dispersió ens indica que el senyal enviat prèviament, ha sofert més d'un rebot i, per tant, l'ona enviada ha realitzat diverses reflexions. Tal com hem dit anteriorment (figura 38), l'eix de les abscisses correspon a la freqüència de les ones (Hz), i l'eix de les ordenades a l'altura en la qual les ones han sofert la reflexió (km). (R-13)

Comparant la figura 38 i 40, en condicions tranquil·les (figura 38) la freqüència de 4 MHz rebota a una altura aproximada de 370 km, i en condicions pertorbades (figura 40) la freqüència de 4 MHz rebota entre 380-750 km d'altura. També es pot observar que per una mateixa freqüència els rebots tenen diferents colors, indicant com s'ha explicat en la figura 28.1 que els rebots provenen de diferents angles. La figura 40.1 mostra un skymap en condicions de ionosfera pertorbada. En ella es veu clarament que el senyal ja no rebota d'una regió concentrada, sinó que prové d'una gran regió que s'estén des de  $-35^{\circ}$  a  $35^{\circ}$  zenitals en la direcció oest-est.



**Figura 40.1**

Aquest "skymap", a diferència del mostrat en la figura 38.1, presenta una pertorbació en l'espai, ja que les reflexions no es troben concentrades en un angle mínim, sinó que s'observa una gran dispersió al llarg de la figura major de 30°. Així doncs, aquest mapa ens mostra la dimensió de l'EPBs. \*

Aquesta dispersió del senyal ens dóna una idea de les dimensions de la pertorbació, tal com explicaré més endavant. Suposant que la reflexió prové d'una alçada de 300 km i amb un angle zenital de 30° d'extensió, podem estimar que la dimensió de la irregularitat (vegeu secció 7 d).

Com s'ha mostrat anteriorment, les observacions de les EPBs vistes amb els senyals dels satèl·lits són ben diferents de les vistes pels sondejador ionosfèrics. A les de satèl·lits, les EPBs es caracteritzen per una disminució del CTE i als ionogrames per una dispersió del senyal o eixamplament de l'altitud de reflexió.

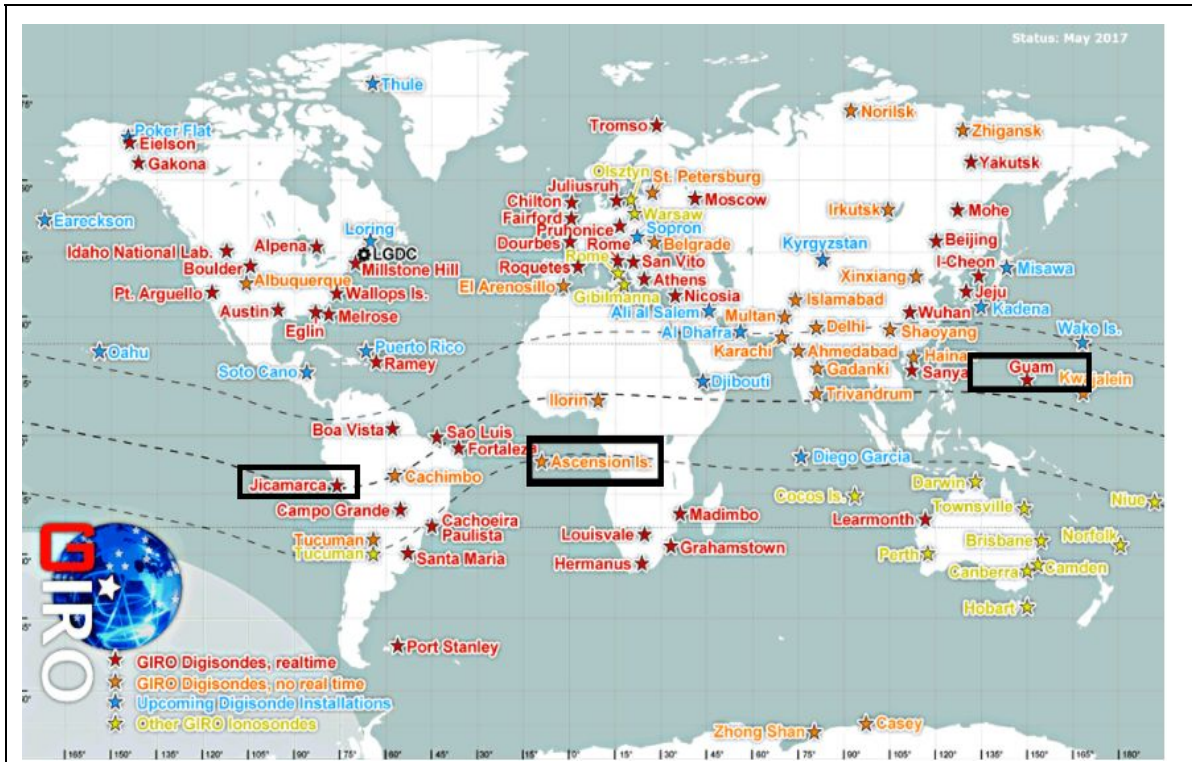
## 7. PART PRÀCTICA

La part pràctica d'aquest treball de recerca consisteix en buscar una relació entre la disminució del CTE satel·lital i la dispersió del senyal als ionogrames. A tal efecte s'analitzaran les dues sèries de dades obtingudes quan es manifesten EPBs. La meua hipòtesi és que existeix una relació entre els efectes obtinguts pels dos mètodes d'observació i que aquesta podria ser lineal. En el cas que els resultats confirmen la hipòtesi, aquests podrien servir per complementar-se, és a dir, si tenim dades satel·litals amb disminució del CTE, aquestes es podrien fer servir per estimar la dispersió del senyal als ionogrames, que actualment només s'observaria amb sondejadors ionosfèrics, i viceversa, la dispersió del senyal observada als ionogrames es podria utilitzar per estimar la disminució del CTE satel·lital.

### a. Dades

Per un costat, per realitzar aquesta part pràctica, treballaré amb dades de receptors satel·litals. Aquestes dades me les ha proporcionat el personal de l'Observatori de l'Ebre. Es tracta d'informació obtinguda amb la ferramenta dissenyada per la Dra. Estefania Blanch i pel Dr. David Altadill per a localitzar i caracteritzar les EPBs a latituds equatorials. Els detalls sobre el funcionament d'aquesta ferramenta es poden trobar en la R-10. Aquesta ferramenta ens informa sobre quina ha estat l'estació de registre satel·lital on s'han detectat bombolles de plasma, quina ha estat la seva duració ( $D_{sat}$ , min), la disminució màxima de CTE que ha causat ( $P_{sat}$ , TECU), el temps inicial i final de la pertorbació ( $T_{i\ sat}$ ,  $T_{f\ sat}$ , respectivament, en hores) i el temps de màxima pertorbació ( $T_{M\ sat}$ , h). Les estacions que he seleccionat es troben distribuïdes sobre l'equador, i en particular sobre: Arequipa (2014), situada al Perú; Guam (2014), situada al Pacífic i Ascension Island (2002), al Atlàntic.

Per l'altre analitzaré els ionogrames enregistrats pels sondejadors ionosfèrics més propers a les estacions de registres satel·litals anteriors i que en particular són: Jicamarca (2014), al Perú; Guam (2014), al Pacífic i Ascension Island (2002), a l'Atlàntic (figura 41). Cal indicar que el sensor satel·lital a Arequipa està gairebé al mateix lloc que el sondejador de Jicamarca. Per analitzar els ionogrames utilitzaré la ferramenta SAO Explorer dissenyada per a l'anàlisi i interpretació dels ionogrames dels sondejadors ionosfèrics per Umass Lowell (R-11). Amb aquesta ferramenta podré obtenir la dispersió observada als ionogrames i la durada d'aquest fenomen sobre cada una de les estacions esmentades anteriorment (figura 41).



**Figura 41**

En aquest mapa es poden observar totes les estacions en les quals hi ha sondejadors ionosfèrics, entre les quals es troben les estudiades en aquest treball: Ascension Island (Atlàntic), Guam (Pacífic) i Jicamarca (Perú). (R-41)

Si ens fixem, podem comprovar que totes les estacions estudiades es localitzen a l'Equador tal com indica la figura 41. Aquest fet és degut al fet que en aquestes zones la quantitat d'irregularitats i pertorbacions és molt major (R-10). Per tant, en aquesta zona serà més fàcil obtenir dades amb irregularitats presents.

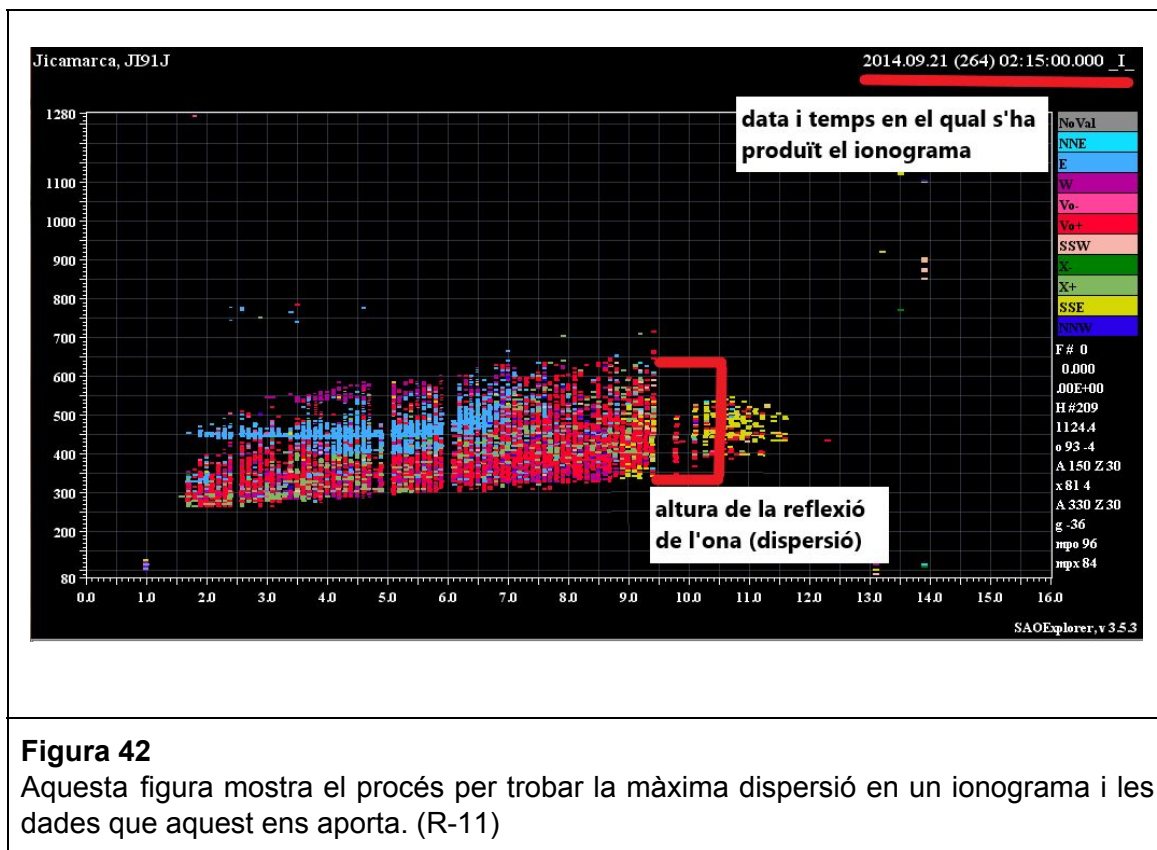
## b. Experiment

D'una banda, a partir de les dades proporcionades per l'Observatori, analitzarem per a cada sensor satel·lital que tenim en compte:  $D_{sat}$ ,  $P_{sat}$ ,  $T_{i\ sat}$ ,  $T_{f\ sat}$  i  $T_{M\ sat}$ , que caracteritzen les EPBs mitjançant els satèl·lits.

D'altra banda, amb la ferramenta SAO Explorer, podré buscar els ionogrames registrats pels sondejadors ionosfèrics més propers a les estacions satel·litals prèviament estudiades. Les dades necessàries per al treball les he elaborat jo mitjançant l'aplicació del SAO Explorer. Aquesta em permet accedir als ionogrames realitzats en els últims anys de tots els llocs en els quals hi ha estacions amb sondejadors ionosfèrics. Un cop he obtingut tots els ionogrames desitjats, a partir d'aquests, trobo l'altura de la reflexió de les ones dels ionogrames en els quals apareix una dispersió pronunciada.

A més a més, aquesta aplicació porta incorporat la data i el temps en el qual s'ha produït el ionograma, de tal manera que també podem trobar la durada de la dispersió localitzant el primer ionograma que apareix pertorbat i l'últim. Així mateix, els ionogrames ens permetran veure les dispersions que hi ha en l'espai (figura 40), les quals són degudes a les EPBs detectades pels satèl·lits respectius (figura 36) i determinar les variables que caracteritzen les EPBs observades amb els sondejadors . Aquestes seran el temps inicial i final de la pertorbació ( $T_{i\ ion}$ ,  $T_{f\ ion}$ , respectivament, en hores) i el temps de màxima pertorbació ( $T_{M\ ion}$ , h), quina ha estat la seva durada ( $D_{ion}$ , min), i la pertorbació màxima observada en els ionogrames ( $P_{ion}$ , km). El temps inicial el determinaré quan es comenci a observar una dispersió en els ionogrames. El temps final, quan aquesta dispersió deixi d'observar-se. El temps màxim, quan la dispersió sigui màxima. La durada es determinarà com la diferència entre el temps final i el temps inicial. Per últim, la dispersió màxima correspondrà al màxim rang observat tal com il·lustra la figura 42.





La pràctica consisteix, un cop obtingudes i analitzades totes les diferents dades, tant satel·litals com corresponents als sondejadors ionosfèrics, en comparar les dades proveïdes pels sensors satel·litals amb les obtingudes pels sondejadors ionosfèrics. Per fer les comparatives, amb totes les dades d'EPBs d'origen satel·lital proporcionades per l'Observatori de l'Ebre he creat les sèries de dades de  $T_{i\ sat}$ ,  $T_{f\ sat}$ ,  $T_{M\ sat}$ ,  $D_{sat}$ ,  $P_{sat}$ , per a cada sensor (Arequipa, Ascension Island i Guam) que he comparat amb les sèries de dades que he creat mitjançant els ionogrames obtinguts amb la ferramenta *SAO Explorer* de  $T_{i\ ion}$ ,  $T_{f\ ion}$ ,  $T_{M\ ion}$ ,  $D_{ion}$ , i  $P_{ion}$ , respectivament i per a cada sensor (Jicamarca, Ascension Island i Guam). També he intentat trobar una relació simple per a cada un dels parells de sèries ( $[T_{i\ ion}, T_{i\ sat}]$ ,  $[T_{f\ ion}, T_{f\ sat}]$ ,  $[T_{M\ ion}, T_{M\ sat}]$ ,  $[D_{ion}, D_{sat}]$ , i  $[P_{ion}, P_{sat}]$ ). Aquesta relació simple es basa en estimar un ajust lineal (determinar la recta que millor s'ajusta) a la representació de les sèries obtingudes amb les dades dels sondejadors respecte de les sèries de dades proveïdes del satèl·lit aprofitant la ferramenta dels fulls de càlcul del "Google - Docs". Per poder relacionar i comparar aquestes dades crearé gràfics de dispersió per a cada una de les variables estudiades. Amb aquests gràfics podré obtenir l'equació que relaciona les dues components, el coeficient de correlació i l'ajust lineal.

$$y_{ion} = a \cdot x_{sat} + b; R^2 \quad \text{Fórmula 9}$$

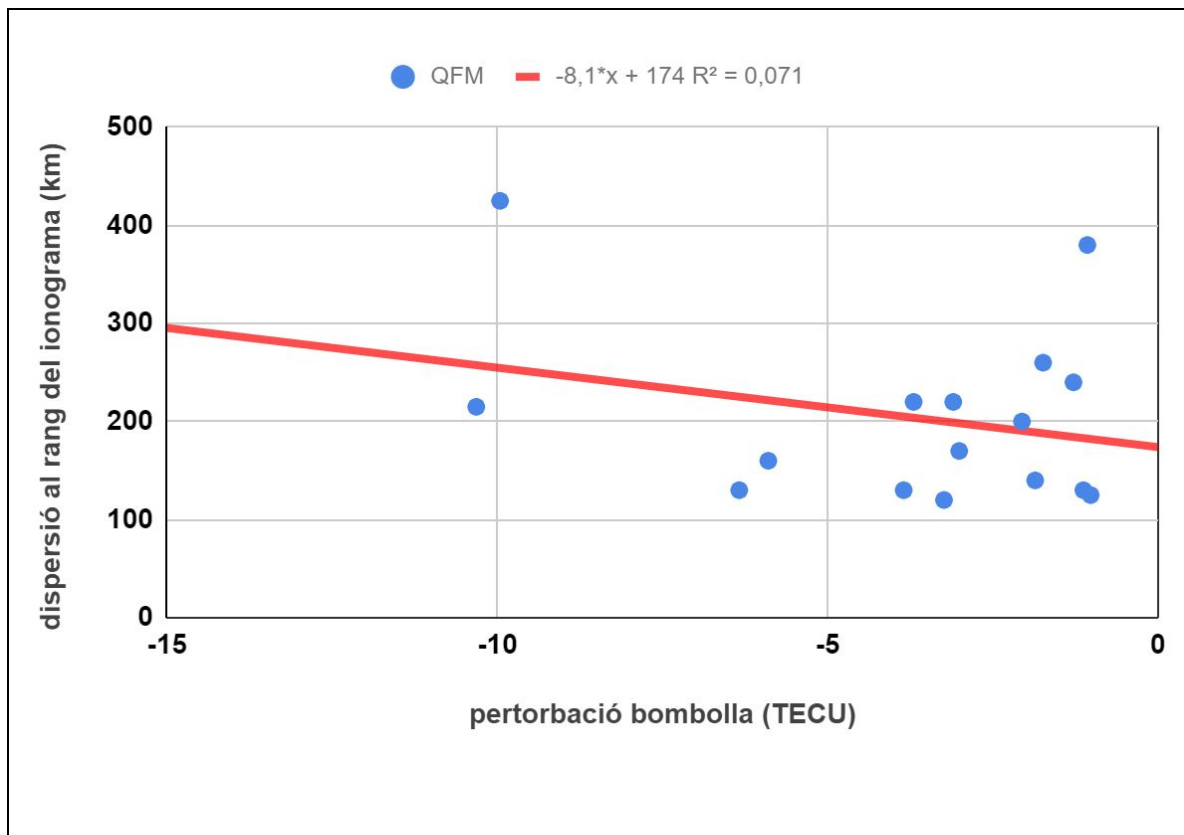
On  $y_{ion}$  fa referència a les sèries obtingudes amb les dades dels sondejadors ( $T_{i\ ion}$ ,  $T_{f\ ion}$ ,  $T_{M\ ion}$ ,  $D_{ion}$ , i  $P_{ion}$ ),  $x_{sat}$  fa referència a les sèries proveïdes de satèl·lit ( $T_{i\ sat}$ ,  $T_{f\ sat}$ ,

$T_{M\ sat}$ ,  $D_{sat}$ ,  $P_{sat}$ ). Les constants a i b de la recta seran diferents per a cada un dels parells de sèries que es comparen i representen el pendent de la recta (a) i el punt de tall a l'origen (b). Al seu torn,  $R^2$ , que varia entre 0 i 1, és un indicador estadístic que determina el grau de dependència lineal entre les dues variables o sèries. Com més pròxim sigui  $R^2$  a 1, més elevada és la relació lineal i com més pròxim a 0 menys relació o dependència lineal hi ha entre les variables.

**c. Resultats**

**i. Resultats Atlàntic (estacions d'Ascencion Island):**

**- Relació entre  $P_{ion}$  i  $P_{sat}$**

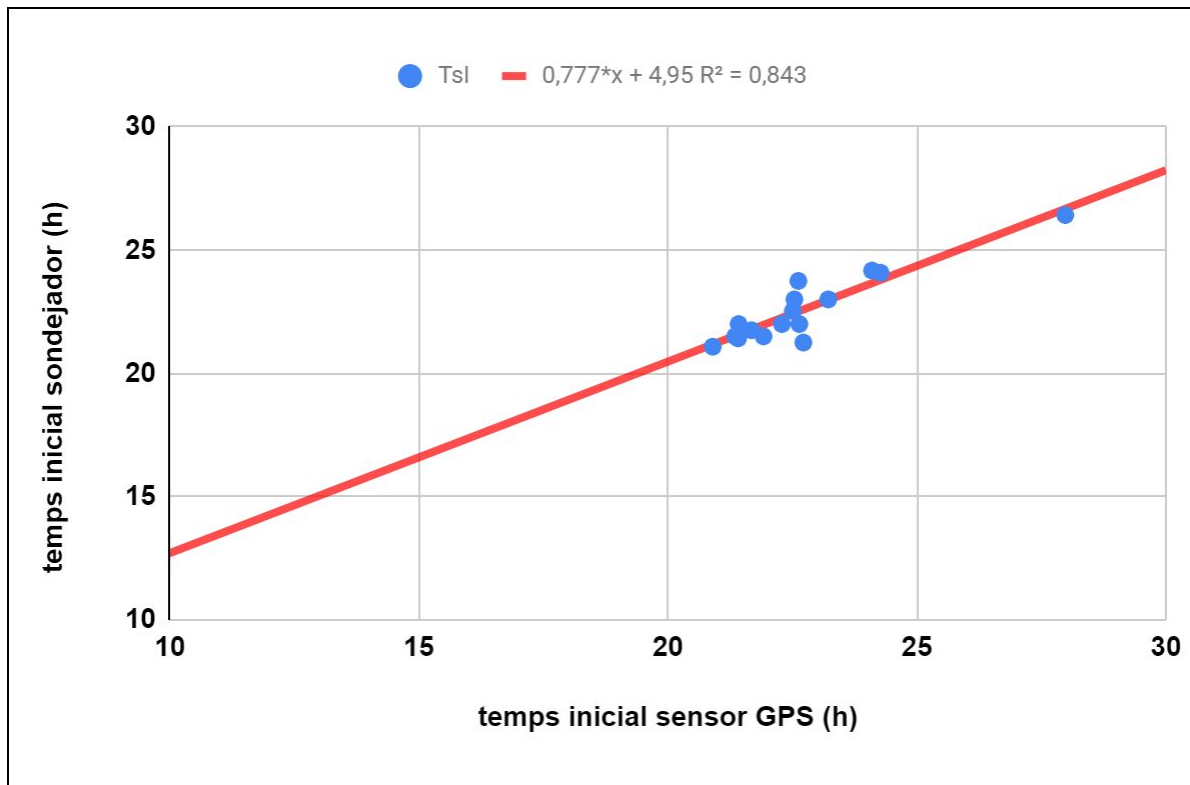


**Figura 43**

Gràfic de dispersió entre  $P_{ion}$  i  $P_{sat}$

El gràfic de la figura 43 ens relaciona la dispersió captada pel sondejador amb la pertorbació de la bombolla. Es pot observar que el coeficient de correlació entre aquestes variables és molt petit, tan sols de 0,071, indicant una baixa dependència d'una sèrie respecte de l'altra. Per tant, la dependència no és lineal i no es pot determinar una relació directa entre les dues sèries de dades.

- Relació entre  $T_{i\text{ion}}$  i  $T_{i\text{sat}}$

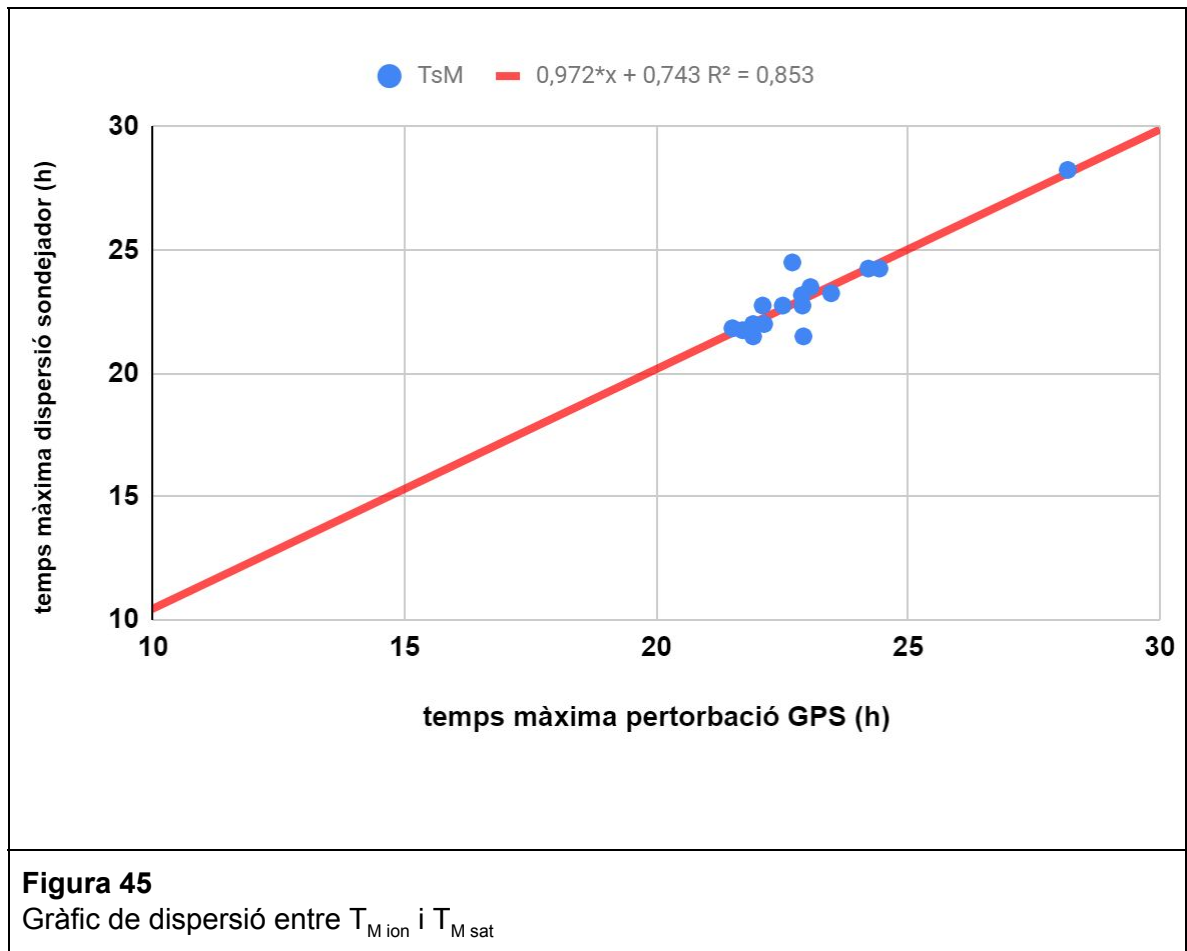


**Figura 44**

Gràfic de dispersió entre  $T_{i\text{ion}}$  i  $T_{i\text{sat}}$

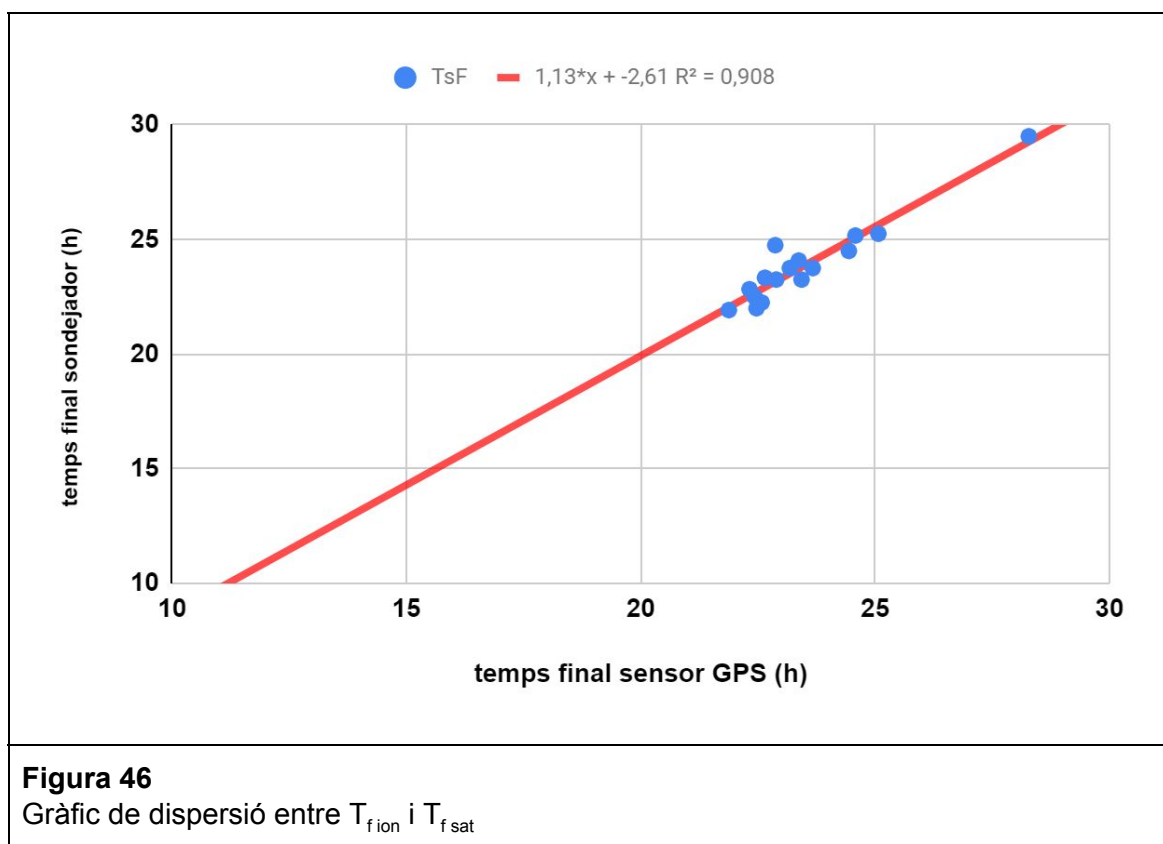
En la figura 44 s'observa la relació entre tots dos temps inicials del sondejador ionosfèric i del sensor satel·lital. A diferència del gràfic anterior, en aquest, el coeficient de correlació és bastant elevat i podem determinar que sí que hi ha una dependència lineal entre les dues variables. Així doncs, amb aquesta relació, podem estimar una dada a partir de l'altra, tenint en compte que hi hauria un cert marge d'error, sense necessitat de l'aparell que la realitza.

- Relació entre  $T_{M\ ion}$  i  $T_{M\ sat}$



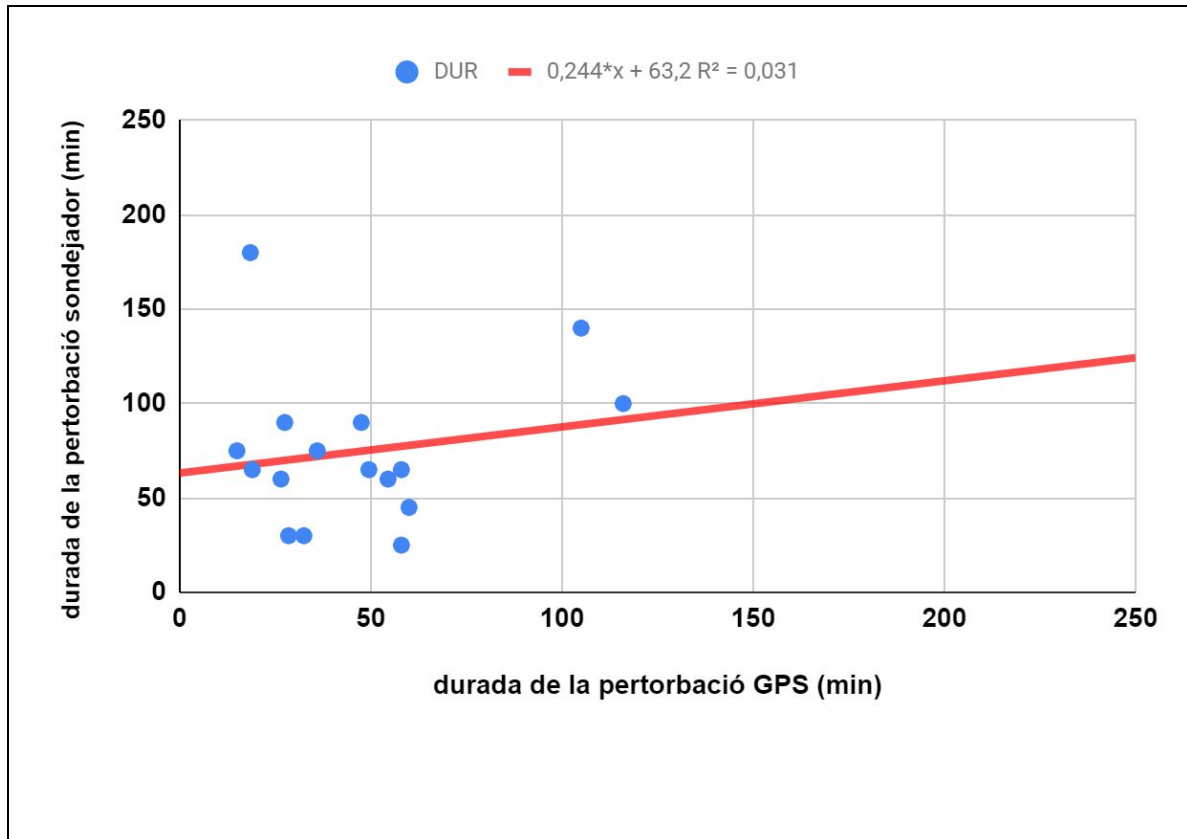
Al seu torn, aquest gràfic (figura 45) ens mostra el moment en el qual, tant el sondejador ionosfèric com el sensor satel·lital, han detectat la dispersió o l'EPBs en el seu estat màxim. En aquest cas, el resultat també és prou positiu, ja que el coeficient de correlació és de 0,853, una xifra bastant elevada. D'aquesta manera, al ser una dependència lineal i tal com hem deduït a partir del gràfic anterior, podem estimar una dada a partir d'una altra quantitativament sense necessitat de l'aparell pertinent.

- Relació entre  $T_{f\ ion}$  i  $T_{f\ sat}$



Altrament, en la figura 48 es mostra la dependència entre el temps que ens indica el final de la dispersió o pertorbació captades pel seu respectiu aparell. En aquest cas, també trobem que el coeficient de correlació és força elevat i, conseqüentment, hi ha dependència lineal. Així doncs, tal com he citat anteriorment, es pot obtenir el resultat d'una d'aquestes variables a partir de la corresponent a l'altra ferramenta.

- Relació entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$



**Figura 47**

Gràfic de dispersió entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$

Finalment, l'últim gràfic (figura 47) no ens mostra una dependència tan positiva com les anteriors figures, sinó que el coeficient de correlació en aquest cas torna a ser molt baix, de 0,031. Per tant, la dependència no és lineal i malauradament, no es podria determinar a partir d'una dada d'un sensor la corresponent a l'altre.

Totes les figures corresponents als gràfics de dispersió (figures 43-47) mostren en la seva part superior una equació amb el coeficient de correlació a la seva vora. L'equació dels gràfics relacionats amb el temps ens indica la relació entre les dues variables de temps (GPS i sondejador) tal com indica la fórmula 9.

En les dades de temps inicial de pertorbació els registres dels ionogrames mostren que la pertorbació es detecta dominantment abans que en les dades dels satèl·lits. En canvi, en les dades de temps final de pertorbació els registres dels ionogrames es detecten amb posterioritat als del satèl·lit. Això és degut al fet que el sondejador detecta la pertorbació amb un angle, de tal manera que té més camp de visió que no pas el sensor GPS que la detecta mitjançant un feix vertical.

La següent taula (taula 1) recopila els valors de correlació i de les constants que determinen la recta de l'ajust lineal (fórmula 9) per a cada una de les variables

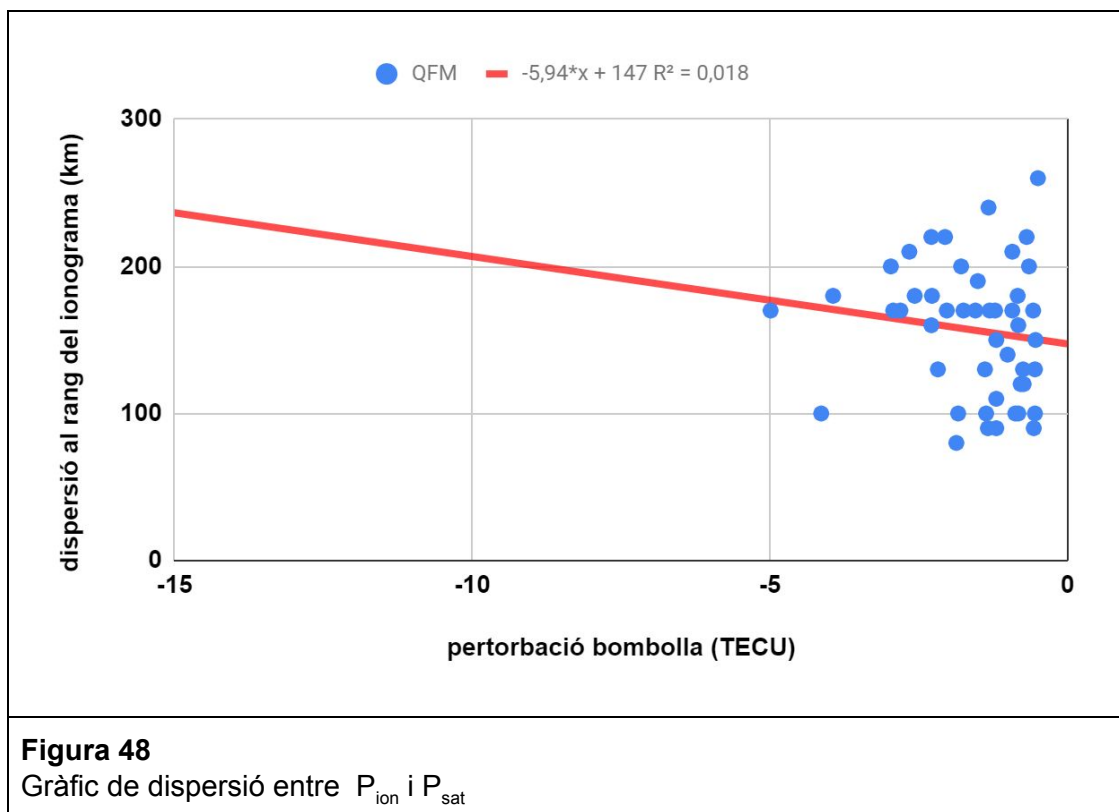
estudiades. Les dades amb un fons verd indiquen una bona dependència lineal, mentre que les dades amb un fons ataronjat indiquen que no hi ha una dependència lineal.

**Taula 1**

	a	b	R <sup>2</sup>
T <sub>i</sub>	0,77	4,95	0,843
T <sub>m</sub>	0,972	0,793	0,853
T <sub>f</sub>	1,13	-2,61	0,908
D	0,244	63,2	0,031
P	-8,1	174	0,071

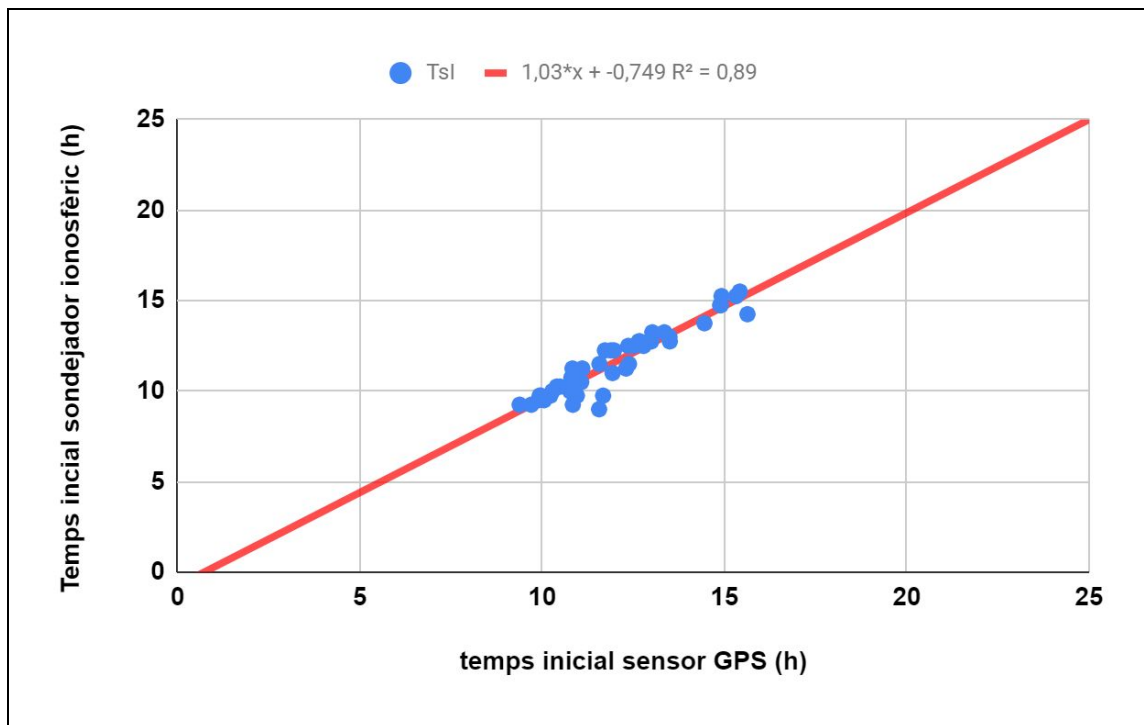
ii. **Resultats Pacífic (estacions de Guam):**

- **Relació entre P<sub>ion</sub> i P<sub>sat</sub>**



Aquest gràfic (figura 48) ens mostra la dependència entre la dispersió captada pel ionograma i la pertorbació detectada pel sensor GPS (satel·lital). En aquest cas, el coeficient de correlació és de 0,018. En conseqüència, no hi ha gairebé dependència entre totes dues variables, fet que provoca que no es pugui establir una relació directa entre les dades.

- Relació entre  $T_{i\ ion}$  i  $T_{i\ sat}$



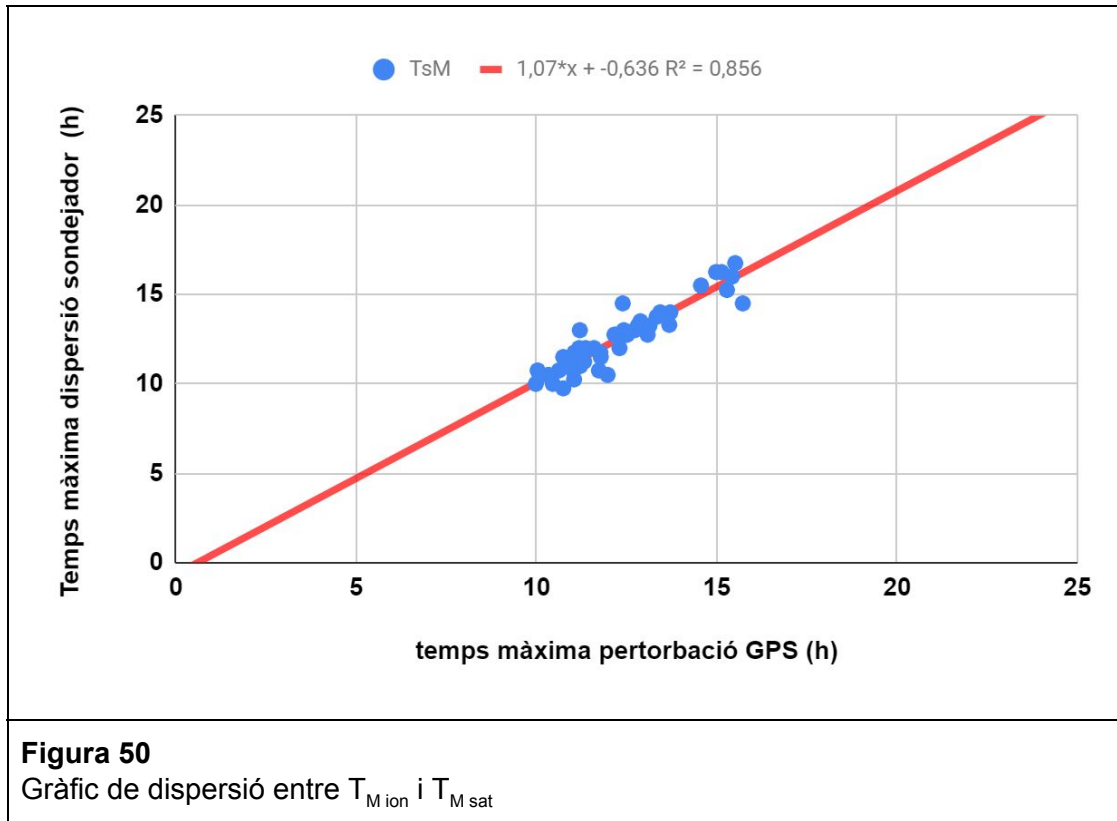
**Figura 49**

Gràfic de dispersió entre  $T_{i\ ion}$  i  $T_{i\ sat}$

Tal com succeeix en l'estació anterior, el temps en el qual és detectada la pertorbació en l'espai per primera vegada en tots dos aparells és molt similar, ja que té un coeficient de correlació força elevat. D'aquesta manera, podem observar en la figura 49 una línia força recta que ens permet estimar la dependència entre les dues variables.



- Relació entre: els temps de la màxima perturbació captada

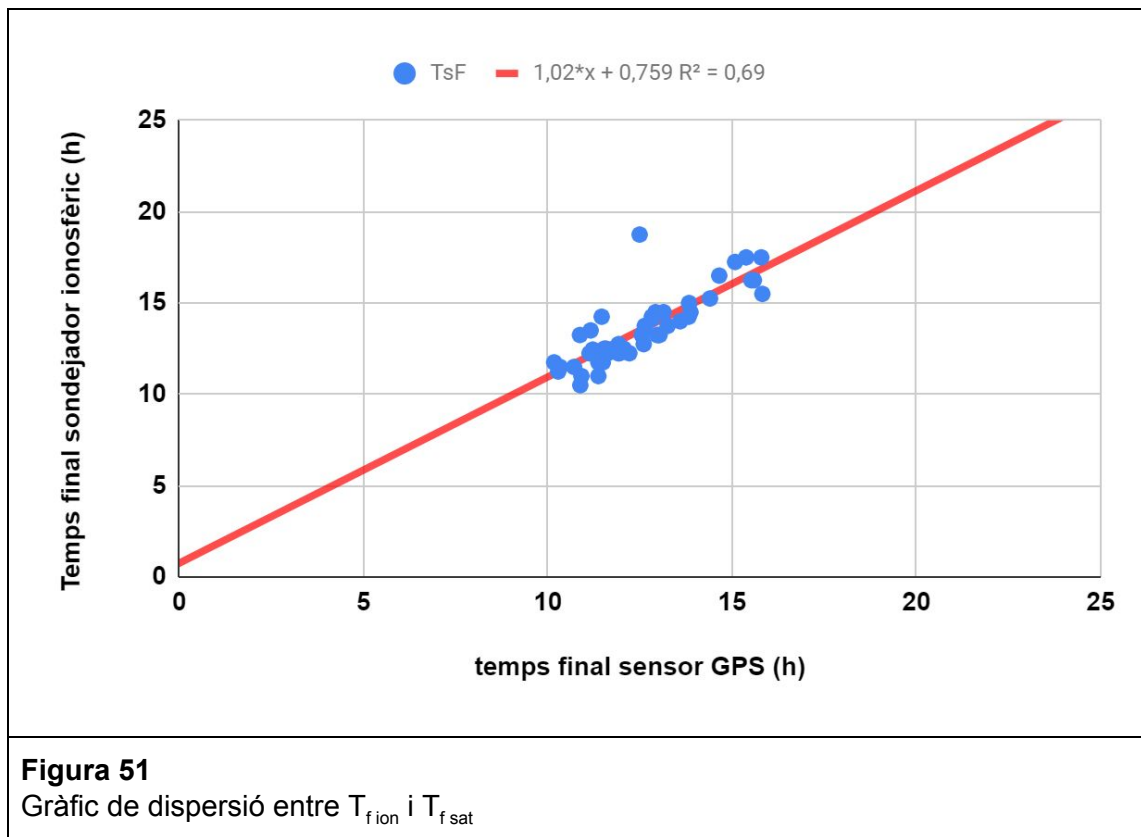


**Figura 50**

Gràfic de dispersió entre  $T_{M \text{ ion}}$  i  $T_{M \text{ sat}}$

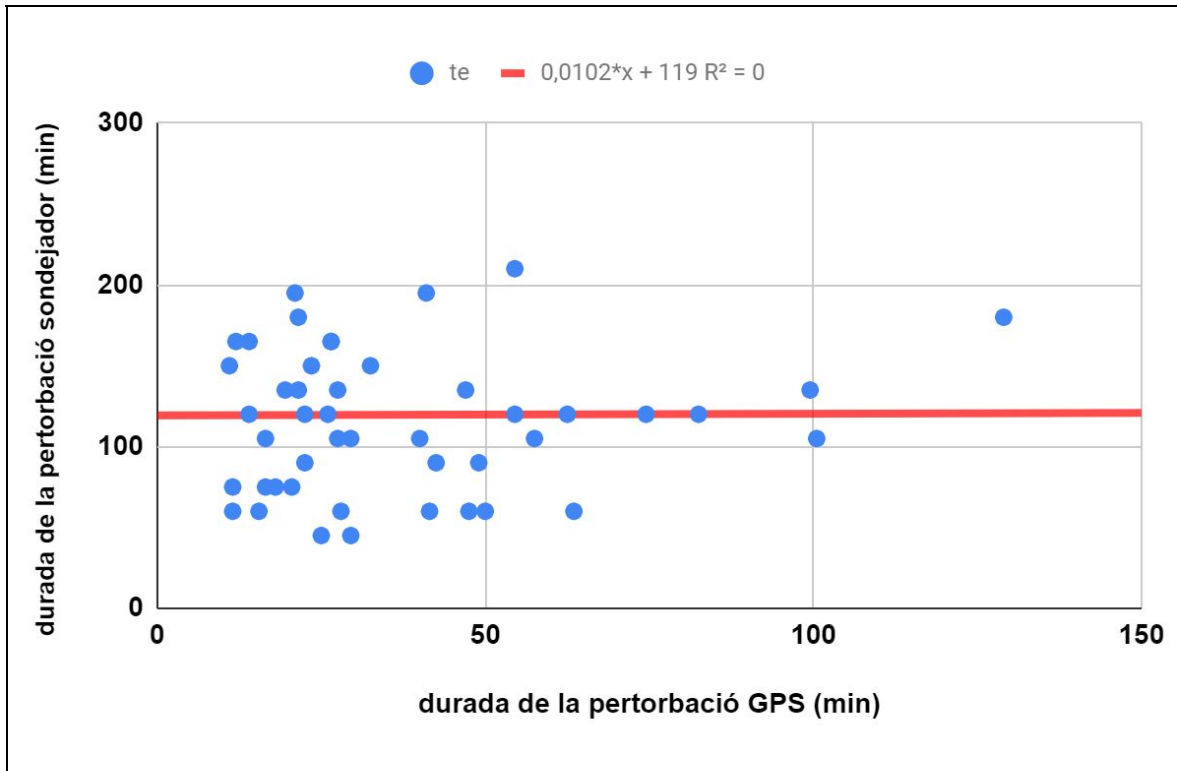
De la mateixa manera, en el gràfic de la figura 50, podem observar la relació entre el moment en què apareix la màxima dispersió en el ionograma i la màxima grandària de l'EPBs, aquestes variables també tenen una dependència lineal, com es pot veure, hi ha un coeficient de correlació de 0,856, força elevat. Aquesta dependència entre variables, al seu torn, ens permet deduir que tots dos aparells estan mesurant alhora un mateix fenomen independentment de les seves diferències a l'hora de mesurar.

- Relació entre  $T_{f\ ion}$  i  $T_{f\ sat}$



Aquest gràfic (figura 51) és força similar als dos anteriors, en aquest cas, però es mostren el temps on es deixa de detectar la dispersió o la pertorbació en l'espai, per l'aparell respectiu. La dependència entre variables o sèries, de la mateixa manera que hem vist anteriorment, també és força elevada i lineal.

- Relació entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$



**Figura 52**

Gràfic de dispersió entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$

Finalment, en la figura 52, la qual és similar a la figura 47, la durada de la dispersió captada pel sondejador i de la pertorbació detectada pel sensor satel·lital no coincideixen gens, el seu coeficient de correlació és zero. La baixa dependència entre sèries ens indica que els aparells d'observació no detecten el mateix temps els fenòmens enregistrats respectivament. Aquest fet, però, es pot deduir, ja que, com prèviament he explicat (en l'apartat 7 a), el sondejador detecta els fenòmens en l'espai amb un cert angle, és a dir, té més camp de visió que no pas el sistema satel·lital, el qual detecta les irregularitats mitjançant un feix gairebé vertical (figura 28.1 i figura 29).

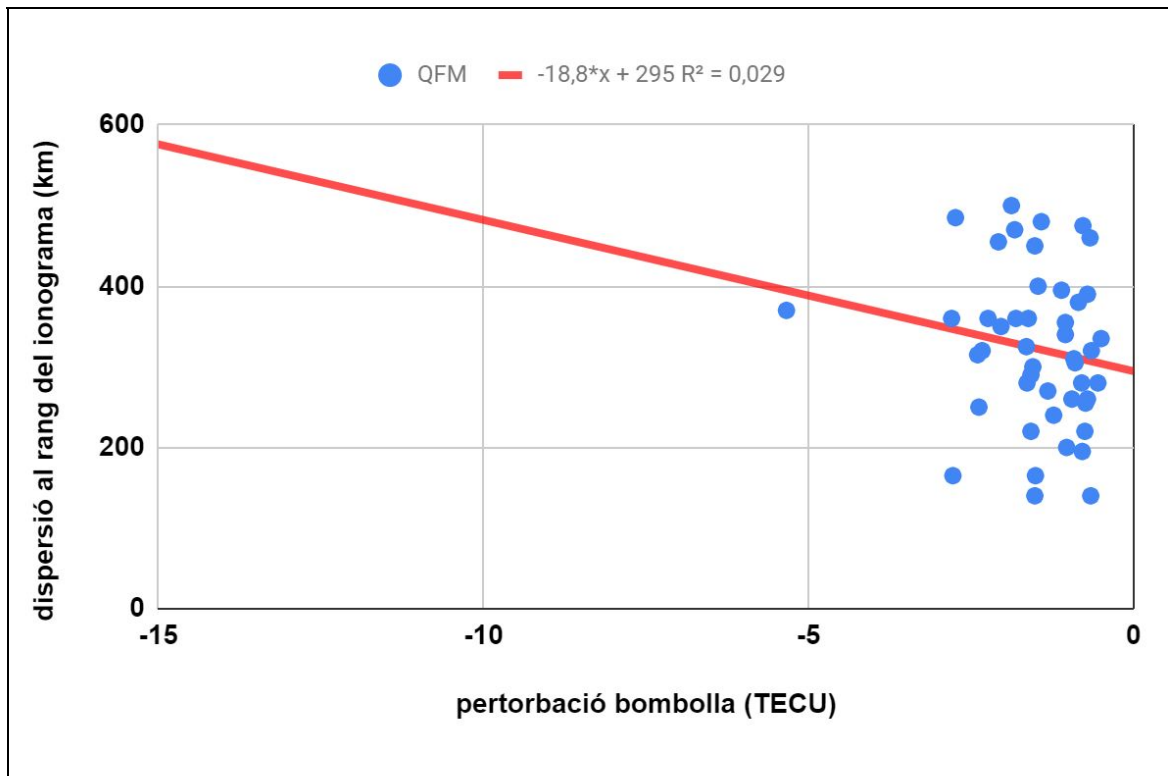
Tal com he fet amb les dades de l'estació anterior, en aquesta també he realitzat la taula (taula 2) que recopila els valors de correlació i de les constants que determinen la recta de l'ajust lineal (fórmula 9) per a cada una de les variables estudiades. De la mateixa manera que en la taula destinada per comparar les dades de l'anterior estació, les dades amb un fons verd indiquen una bona dependència lineal, mentre que les dades amb un fons ataronjat indiquen que no hi ha una dependència lineal.

Taula 2

	a	b	R <sup>2</sup>
T <sub>i</sub>	1,03	-0,749	0,89
T <sub>m</sub>	1,07	-0,636	0,856
T <sub>f</sub>	1,02	0,759	0,69
D	0,0102	119	0
P	-5,94	147	0,018

iii. Resultats Perú:

- Relació entre P<sub>ion</sub> i P<sub>sat</sub>

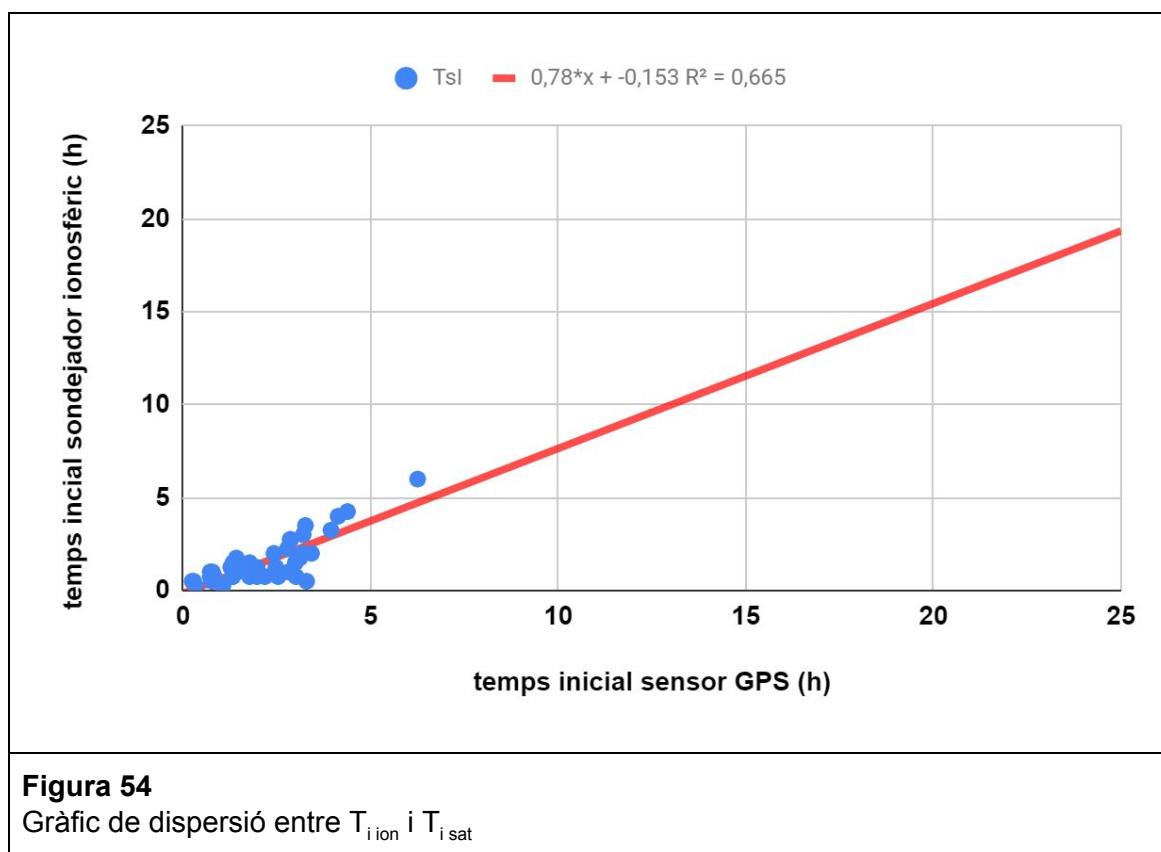


**Figura 53**

Gràfic de dispersió entre P<sub>ion</sub> i P<sub>sat</sub>

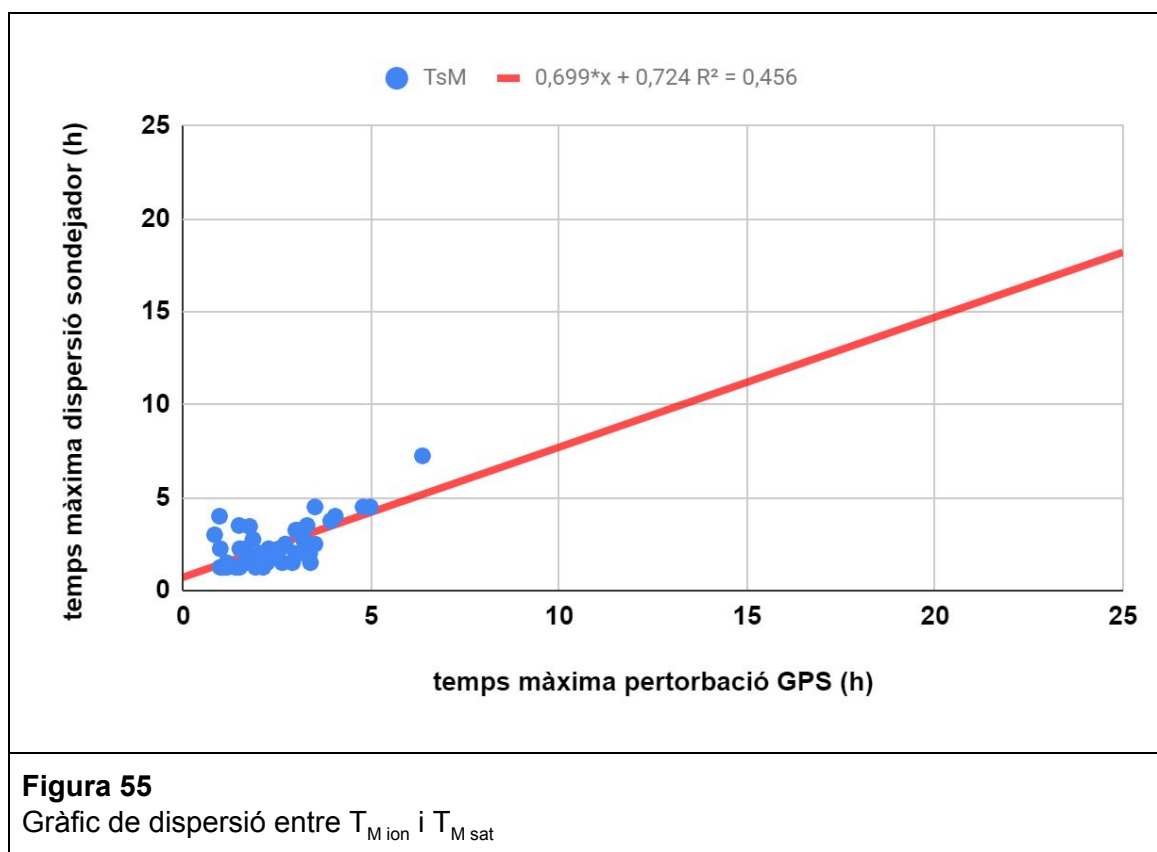
De la mateixa manera que en les estacions anteriors, aquest gràfic (figura 53) ens mostra que hi ha una molt baixa correlació entre la pertorbació detectada pel sistema GPS i la dispersió captada al rang del ionograma. Per tant, es pot afirmar que no hi ha quasi dependència lineal entre aquestes variables.

- Relació entre  $T_{i\ ion}$  i  $T_{i\ sat}$



Tal com ha succeït en les estacions estudiades prèviament, en la figura 54 s'observa que el temps en què es comença a detectar una irregularitat o fenomen en tots dos mètodes d'observació és força similar, ja que el coeficient de correlació és prou elevat en aquesta estació també. Malgrat tot, aquest coeficient és de 0,665, una mica més baix que els obtinguts en les altres estacions, els coeficients de correlació de les quals eren superiors a 0,8.

- Relació entre  $T_{M \text{ ion}}$  i  $T_{M \text{ sat}}$

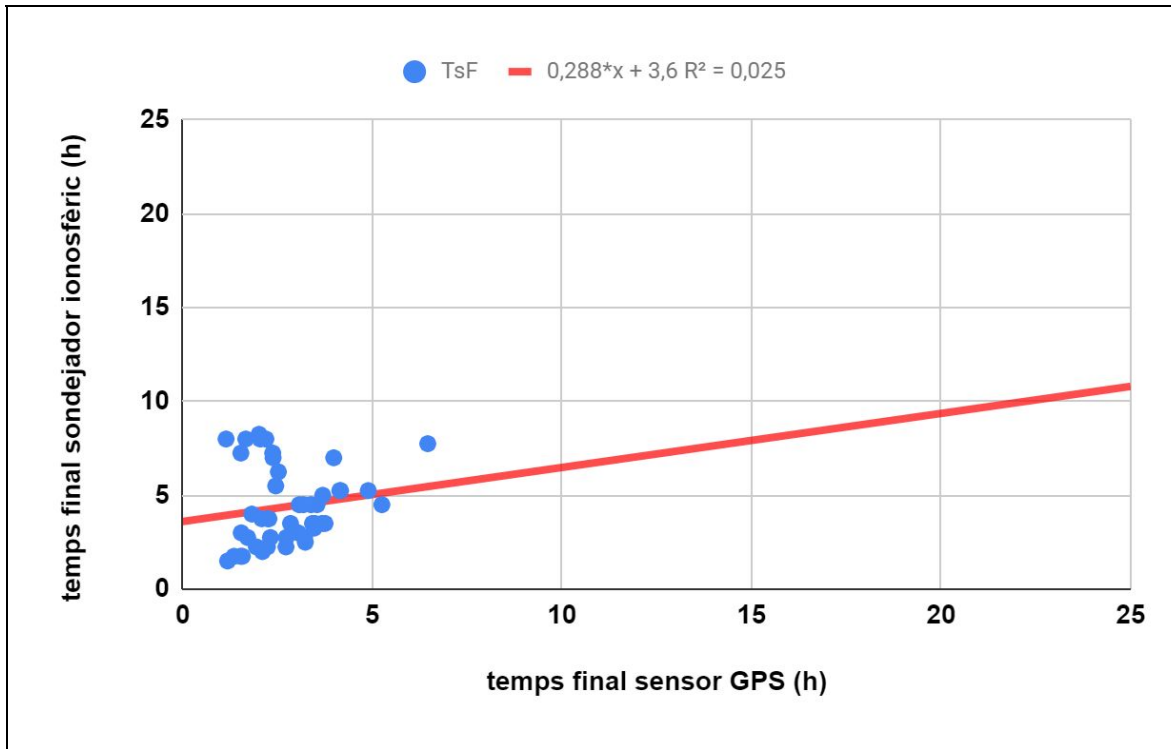


**Figura 55**

Gràfic de dispersió entre  $T_{M \text{ ion}}$  i  $T_{M \text{ sat}}$

La figura 55 ens mostra que la correlació entre el temps on s'ha detectat una màxima pertorbació pel sistema GPS i el temps en el qual hi ha hagut una màxima dispersió captada pel ionograma no és gaire elevada, però, tot i això, podem considerar positiu aquest coeficient, ja que hi ha moltes dades inserides en aquest gràfic i igualment s'hi ha detectat una dependència mitjanament lineal.

- Relació entre  $T_{f\ ion}$  i  $T_{f\ sat}$

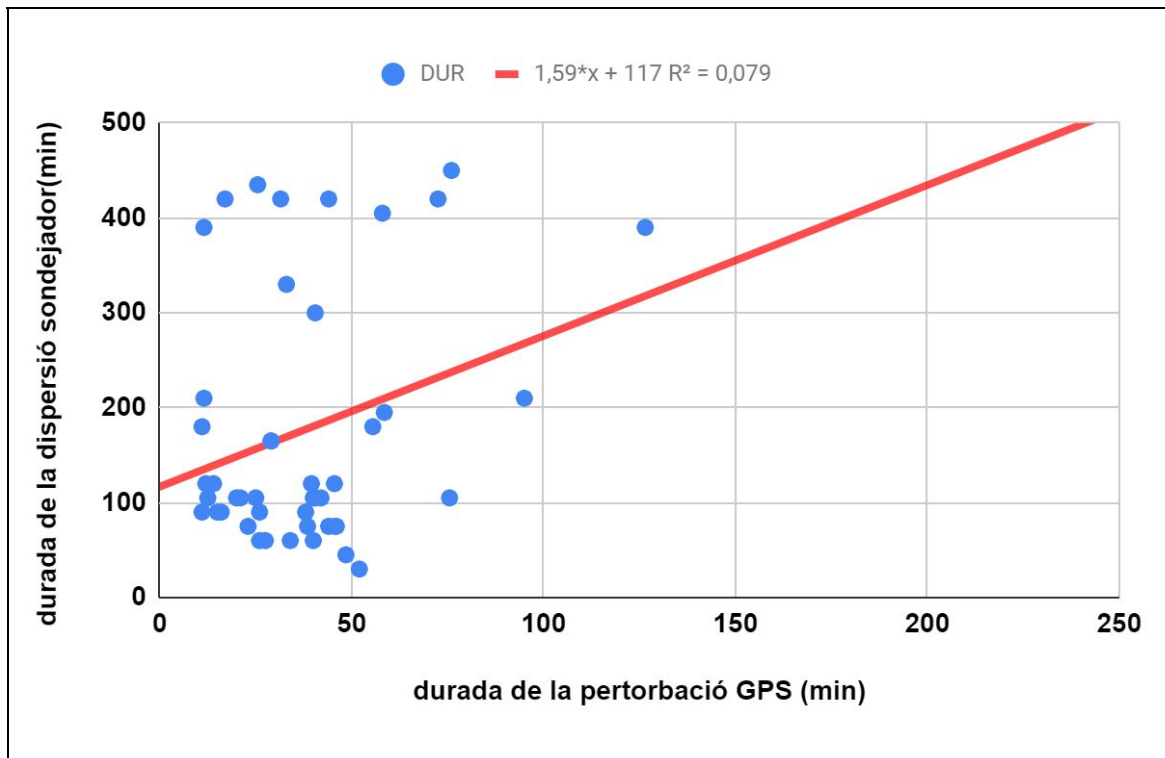


**Figura 56**

Gràfic de dispersió entre  $T_{f\ ion}$  i  $T_{f\ sat}$

A diferència de les estacions anteriors, la correlació entre els temps en què es deixa de detectar una irregularitat en la ionosfera per tots dos mètodes d'observació, és molt baixa, concretament, de 0,025, tal com mostra el gràfic de la figura 56. Es pot suposar que aquesta baixa dependència és deguda a la situació que té aquesta estació, gairebé a la recta de l'Equador. Així doncs, a causa de la seva localització geogràfica, la gran quantitat de perturbacions i irregularitats ionosfèriques pot alterar els resultats.

- Relació entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$



**Figura 57**

Gràfic de dispersió entre  $D_{ion}$  i  $D_{sat}$

Tal com ha succeït en gràfics anteriors, la durada de la dispersió i la durada de la pertorbació detectada pels respectius aparells d'observació quasi no té dependència (figura 57). Un dels factors causants d'aquest fet pot ser que les variables estiguin en diferents unitats de mesura, però aquesta deducció serà explicada més endavant en les conclusions.

Finalment, tal com he realitzat en les estacions prèviament estudiades, aquesta és la taula (taula 3) que recopila els valors de correlació i de les constants que determinen la recta de l'ajust lineal (fórmula 9) per a cada una de les variables estudiades. Com prèviament he explicat, les dades amb un fons verd indiquen una bona dependència lineal, mentre que les que tenen un fons ataronjat indiquen que no hi ha una dependència lineal.



**Taula 3**

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>T<sub>i</sub></b>	0,78	-0,153	0,665
<b>T<sub>m</sub></b>	0,699	0,724	0,456
<b>T<sub>f</sub></b>	0,288	3,6	0,025
<b>D</b>	1,59	117	0,079
<b>P</b>	-18,8	295	0,029

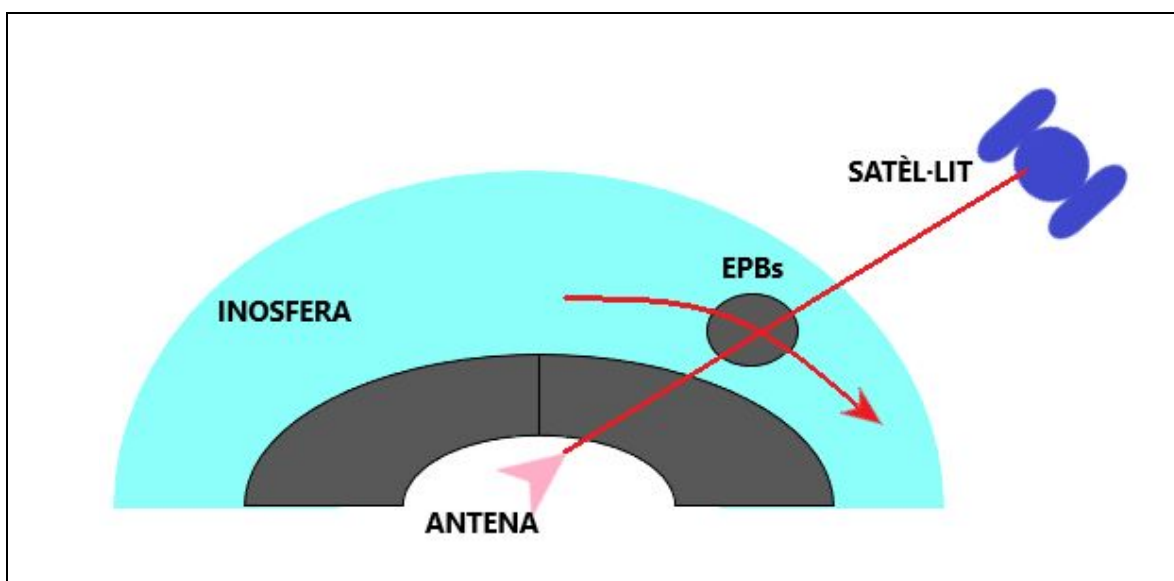
#### **d. Discussió dels Resultats i Conclusions**

En cap de les tres estacions estudiades no hi ha hagut cap correlació entre la dispersió representada en el ionograma i la pertorbació de la CTE (contingut total d'electrons) detectada pel GPS, tal com inicialment havia proposat en la meua hipòtesi. Ara que en aquest treball he pogut conèixer millor els diferents tipus de registres ionosfèrics i el diferent tipus d'informació que s'extreu, podria especular per què no s'ha pogut trobar en aquest experiment una dependència entre la pertorbació que causa una EPBs observada amb els registres de satèl·lit i l'observada amb els sondejadors. Un motiu podria ser perquè el CTE és una magnitud que té en compte tota la ionosfera, ja que els senyals dels satèl·lits han de travessar-la per complet (figura 57), en canvi, en els registres del sondejador només podem veure els efectes en la part de la ionosfera que està per sota del màxim de densitat (Figura 57). Un altre motiu podria ser que els efectes de les EPBs en els registres de satèl·lit que he estudiat es basen en el CTE, mesuren densitats per unitat de superfície, i en els registres del sondejador es basen en la dispersió, i mesuren distància recorreguda pel senyal reflectit, per tant en ser dues magnituds diferents, els efectes no tenen perquè ser similars. Tampoc he trobat una bona dependència entre la durada dels efectes de la pertorbació EPBs observada amb els registres de satèl·lits respecte a l'observada amb els registres dels sondejadors. Això es pot explicar degut al fet que els satèl·lits no estan observant des d'un punt fix de l'espai com ho fan els sondejadors sinó que es desplacen a gran velocitat en les seves òrbites.

En canvi he pogut trobar una clara relació, amb bona dependència lineal, en comparar els temps de detecció observats amb els dos mètodes. Això és degut al fet que els dos sistemes observen efectes del mateix fenomen i aquest es produeix en el mateix temps en el mateix lloc de l'espai. Per tant, hi ha una dependència entre les dues sèries força positiva. A més a més, he pogut comprovar, a partir de les dades, que el registres del sondejador ionosfèric detecten les pertorbacions EPBs abans que la detecten els registres dels satèl·lits. A la vegada, també he comprovat que les EPBs són detectades durant més temps pels sondejadors

ionosfèrics que no pas pels sistemes satel·litals, és a dir, el temps final d'observació de EPBs en els sondejadors és posterior al temps dels satèl·lits.

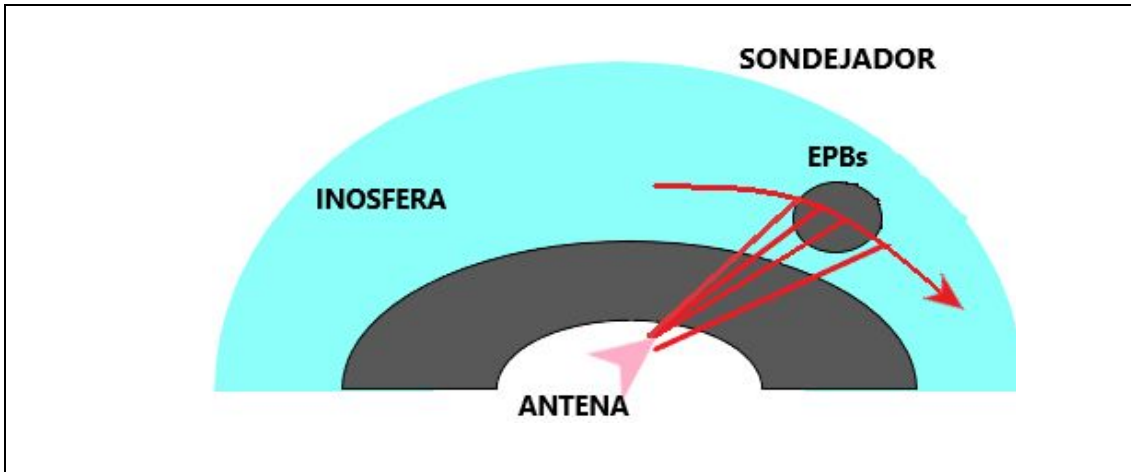
Tenint en compte que, com he explicat en la secció 5, els registres del sondejador ionosfèric proporcionen informació d'un volum sobre el sensor (figura 28.1) i que els registres de satèl·lit proporcionen informació sobre la línia que connecta el satèl·lit amb el sensor a terra (figura 30), una explicació possible perquè els temps de detecció siguin diferents entre els diferents tipus de registre, i perquè a més es detectin abans i deixin de detectar-se després amb els sondejadors que amb els satèl·lits, és que les bombolles de plasma es desplacen horitzontalment en la ionosfera amb una velocitat determinada. Aquest fet intento il·lustrar-lo a les figures 57, 58 i 59.



**Figura 57**

Aquesta figura és una representació del sistema d'observació GPS, exposa la pertorbació i com el satèl·lit envia el senyal atravesant-la a la Terra.

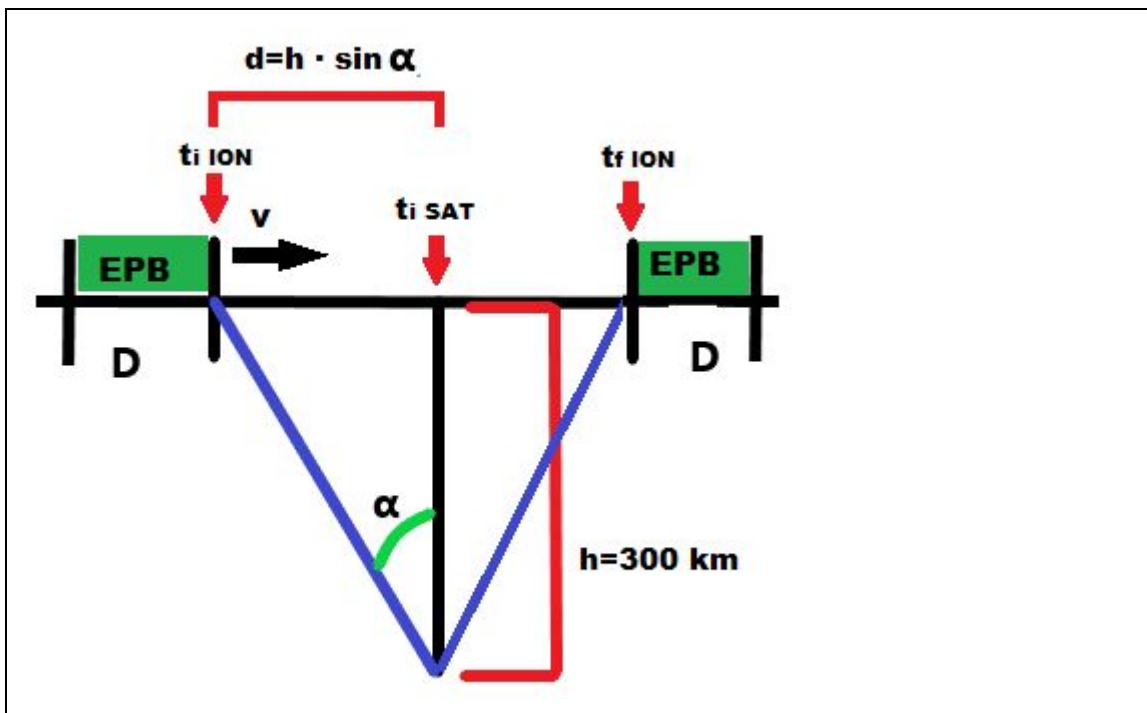
Amb els satèl·lits, les irregularitats es registren quan les EPBs es troben sobre el sensor (figura 57). Ara bé, com els sondejadors ionosfèrics observen un angle en l'espai (Fig 28.1), les EPBs es detecten just quan intersequen amb l'angle de visió del sensor (figura 58). Per tant, a diferència dels sensors satel·litals, els sondejadors comencen a detectar la pertorbació ionosfèrica, no quan aquesta està sobre la mateixa vertical, sinó que ho fan abans a causa de l'angle d'observació. De la mateixa manera, el temps final d'observació de l'EPBs amb els sondejadors diferirà en igual manera amb el temps final d'observació de l'EPBs amb els satèl·lits, en aquest cas, però, el sondejador registrarà més temps la pertorbació.



**Figura 58**

Aquesta imatge és una representació del mètode d'observació del sondejador ionosfèric. Mostra com l'antena rep la informació en un angle, de tal manera que pot detectar les irregularitats durant més temps.

En la figura 59 represento esquemàticament el fenomen que s'observa. Es mostra com la pertorbació EPB, amb una dimensió ( $D$ ), es desplaça a una velocitat ( $v$ ) i com el sondejador la detecta a un temps ( $t_{i\text{ ION}}$ ), que és anterior al temps que la detecta el satèl·lit ( $t_{i\text{ SAT}}$ ). Pel fet que el sondejador té un camp de visió determinat per un angle singular ( $\alpha$ ), durant aquest temps l'EPB recorrerà una distància ( $d = h \cdot \sin \alpha$ ). En cas que coneguem l'alçada a la qual es detecta la pertorbació i coneixem l'angle  $\alpha$ , podem determinar fàcilment aquesta distància  $d$ .



**Figura 59**

Esquema que representa la propagació d'EPBs a la ionosfera.

Al seu torn, gràcies als skymaps dels sondejadors ionosfèrics, podem determinar l'angle de visió d'aquests. Tal com s'indica en les figures 38.1 i 40.1, aquest angle és aproximadament  $\alpha \approx 35^\circ$ . A més a més, tal com mostra la figura 38, l'altura real, determinada pel perfil de densitat electrònica, a la que el sondejador ionosfèric observa les pertorbacions EPBs és aproximadament  $h \approx 300$  km. Així doncs, la distància  $d$  que una EPBs recorrerà des que la detecta el sondejador fins que la detecta el sensor GPS és:  $d = h \cdot \sin\alpha = 300 \cdot \sin 35 = 172$  km (figura 59).

Al seu torn, he calculat amb les dades que he obtingut per a cada estació estudiada (Perú, Pacífic, Atlàntic) quin és el temps mitjà en que els sondejadors respectius detecten la pertorbació respecte del temps que la detecten els satèl·lits. Tenint en compte aquesta diferència de temps i la distància que recorren les EPBs d'acord amb l'esquema anterior (figura 59) fàcilment podem obtenir la velocitat a la qual aquestes es desplacen ( $d = v \cdot t \Rightarrow v = \frac{d}{t}$ ). Els resultats de la diferència de temps promig de detecció entre els sondejadors i els satèl·lits, juntament amb la velocitat estimada es presenten a la taula següent (taula 4):

**Taula 4**

<b>Estació</b>	<b>Temps</b>	<b>Velocitat estimada EPBS</b>
Perú	37 min	77,48 m/s
Atlàntic	8 min	358,33 m/s
Pacífic	23 min	124,64 m/s

Per verificar si aquests càlculs poden ser realistes, he cercat sobre les velocitats de propagació de les EPBs a la literatura i he trobat que R-42 determinen unes velocitats de deriva de les EPBs a la regió del Pacífic entre 50 i 200 m/s, R-43 determinen unes velocitats de deriva de les EPBs a la regió del Brasil, proper al Perú, entre 60 i 150 m/s, i R-45 determinen unes velocitats de deriva de les EPBs a la regió de l'Atlàntic entre 25 i 170 m/s, i citen altres treballs on es determinen velocitats superiors a 200 m/s en aquesta regió de l'Atlàntic. Com es pot comprovar, els resultats de la velocitat que he pogut estimar es troben dintre del rang de velocitats determinat per altres mètodes, validant-los de manera experimental.

A més, amb les dades dels registres del sondejadors, també he calculat quant dura una pertorbació tipus EPBs sobre aquests. Així, considerant que aquesta durada és igual al temps transcorregut entre que el sondejador detecta l'inici i el final de la pertorbació i assumint que aquest temps és degut al fet que la pertorbació es propaga sobre el sondejador, es pot estimar la dimensió espacial d'aquesta EPBs. Si ens fixem amb la figura 59, es pot deduir fàcilment que la distància total DT que recorre una EPBs amb una dimensió determinada D en la direcció de propagació és igual a:

$$DT = 2h \cdot \sin \alpha + D$$

On h és l'altura a la qual el sondejador detecta l'EPB ( $h \approx 300$  km) i  $\alpha$  és l'angle de visió del sondejador ( $\alpha \approx 35^\circ$ ). Aquesta distància total podem estimar-la fàcilment coneixent la durada de la pertorbació observada pel sondejador ( $t_{f\ ION} - t_{i\ ION}$ ) i la velocitat de propagació (v) de l'EPB considerant que:

$$DT = v \cdot (t_{f\ ION} - t_{i\ ION}) .$$

Per tant, fàcilment podem trobar una expressió per deduir la dimensió D de la EPB en la seva direcció de propagació tal com s'indica a continuació:

$$D = v \cdot (t_{f\ ION} - t_{i\ ION}) - 2h \cdot \sin \alpha .$$

Així, he calculat amb les dades que he obtingut per a cada estació estudiada (Perú, Pacífic, Atlàntic) quin és el temps de durada mitjà de pertorbació causada per les EPBs observat als registres dels sondejadors respectius i, tenint en compte els valors estimats de velocitats de propagació de la taula anterior, he pogut estimar la dimensió D de la EPB en la seva direcció de propagació tal com s'indica en la taula següent (taula 5). Cal tenir en compte que aquests càlculs són aproximacions, ja que he suposat que l'altura, la dimensió i la velocitat de les EPBs no canvien en el temps.

**Taula 5**

Estació	Velocitat EPBS	Durada EPBS	Dimensió EPBS
Perú	77,48 m/s	2,88 h	459 km
Atlàntic	358,33 m/s	1,29 h	1318 km
Pacífic	124,64 m/s	2,01 h	558 km

Resumint, en aquest treball he pogut conèixer i treballar ferramentes per a l'observació ionosfèrica. També he pogut detectar pertorbacions ionosfèriques amb

els registres dels sondejadors ionosfèrics. He pogut conèixer una mica la fenomenologia de les perturbacions ionosfèriques causades per les bombolles de plasma i que aquestes poden distorsionar els senyals de radiofreqüència i afectar els sistemes de comunicació. Al llarg de la part pràctica he intentat determinar si existeix alguna mena dependència entre els efectes de les EPBs observats amb els sondejadors i amb els satèl·lits.

Com a conclusió del treball puc dir que, malauradament, no he trobat cap classe de dependència entre les perturbacions detectades pels sondejadors ionosfèrics i les detectades pels sistemes satel·litals, ja que, com he explicat al llarg de l'apartat 7, hi ha factors, com la diferència de les magnituds analitzades, que fa que no siguin dependents una de l'altra. Tot i que la perturbació causada per les EPBs en el registre de satèl·lit i de sondejador que he estudiat no mostren una dependència, si he pogut trobar una dependència entre els temps de detecció d'aquestes perturbacions amb els respectius mètodes d'observació. Aquest fet és un resultat molt important, perquè ens permet preveure perturbacions amb un sistema o amb un altre, independentment, ja que s'ha pogut observar al llarg del treball que tots dos sistemes estan observant un mateix fenomen en el mateix temps. A més a més, els resultats obtinguts mitjançant l'elaboració dels gràfics, m'han permès adonar-me que també podia trobar, de manera aproximada, la velocitat de propagació de les perturbacions i també la seva dimensió. Aquesta estimació l'he comparada amb els resultats d'altres estudis i ha coincidit tot i haver estat estimada mitjançant tècniques diferents. Haver trobat la velocitat a la qual les EPBs es desplacen al llarg de la ionosfera és bastant important per al nostre dia a dia, ja que, tal com havia citat en l'apartat 5 del treball, les perturbacions alteren la propagació de les ones EM i, d'aquesta manera, també alteren i/o perjudiquen l'arribada de la informació que aquestes transporten al seu destinatari. Així doncs, coneixent la velocitat de propagació d'aquestes perturbacions, un cop detectades podem estimar quan afectaran a altres regions al cap d'un determinat temps i, a la mateixa vegada, alertar d'aquest fenomen. També, amb aquesta informació, es pot determinar amb tots dos mètodes d'observació quan l'EPBs deixa d'estar present en una zona de l'espai, de tal manera que les ones EM ja no es veuen afectades i la informació que transporten torna a ser rebuda correctament als sensors destinats a detectar-les.

## 8. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA:

### Referències:

- R-1: Barradas Solà, Francisco; Sánchez Ramos, Guillem; Valera Arroyo, Pedro; Vidal Fernández, M. del Carmen: Llibre de física 1 BAT Grup Santillana Educación/ Promotor\*. Barcelona: 2016. (19/7/2020)
- R-2: *La ionosfera: formació, comportament i tècniques d'observació*. Article realitzat per: German Solé i Dr. David Altadill.
- R-3:<http://acacia.pntic.mec.es/~jrui27/interf/young.htm> (19/7/2020)
- R-4:<https://es.wikipedia.org/wiki/Onda> (21/7/2020)
- R-5:<https://definicion.de/amplitud-de-onda/> (27/7/2020)
- R-6:[https://www.unadmexico.mx/sitios/aplicaciones-107/LITE\\_36/ Un\\_139\\_Resonancia/escenas/2\\_Inicio\\_1.html#:~:text=El%20periodo%20es%20el%20tiempo,es%20el%20inverso%20del%20periodo.](https://www.unadmexico.mx/sitios/aplicaciones-107/LITE_36/ Un_139_Resonancia/escenas/2_Inicio_1.html#:~:text=El%20periodo%20es%20el%20tiempo,es%20el%20inverso%20del%20periodo.) (27/7/2020)
- R-7:[https://www.ecured.cu/%C3%8Dndice\\_de\\_refracci%C3%B3n](https://www.ecured.cu/%C3%8Dndice_de_refracci%C3%B3n) (28/7/2020)  
<https://www.fiscalab.com/apartado/dispersion-luz> (28/7/2020)
- R-8:<https://www.luismonje.com/luz-polarizada/> (31/7/2020)
- R-9:<https://www.fiscalab.com/apartado/interferencias-ondas-armonicas> (4/8/2020)
- R-10: *Improved characterization and modeling of equatorial plasma depletions*. Article realitzat per: Estefania Blanch, David Altadill, Jose Miguel Juan, Adriano Camps, José Barbosa, Guillermo González-Casado, Jaume Riba, Jaume Sanz, Gregori Vazquez, and Raúl Orús-Pérez (21/9/2020)
- R-11:<http://giro.uml.edu/sao-explorer.html> (26/9/2020)
- R-12: *Spread F – an old equatorial aeronomy problem finally resolved?* Article realitzat per: R. F. Woodman. (15/8/2020)
- R-13: *Ionospheric effects on radio systems Plasma Bubbles / Depletions*. Presentació realitzada pel Dr. David Altadill. (15/8/2020)
- R-14: *Perturbaciones ionosféricas itinerantes: Origen, efectos tecnológicos, y mitigación*. Presentació realitzada pel Dr. David Altadill. (17/8/2020)
- R-15: *Análisis de la señal. Técnicas sobre señales electromagnéticas en la ionosfera*. Presentació realitzada per: Dr. David Altadill (24/8/2020)
- R-16: *Observatorio del Ebro. Activos en investigación, observación y divulgación*. (2/9/2020)
- R-17:<https://www.pinterest.com.mx/pin/427701295842402248/>
- R-18:<http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/mgonherf/el-padre-de-la-fisicanewton/>
- R-19:<http://fisica4ever.blogspot.com/2009/03/optica.html>
- R-20:<https://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/huygens.htm>
- R-21:<https://francis.naukas.com/2008/02/27/dualidad-onda-particula-o-el-electron-como-onda-en-el-espacio-de-momentos/>
- R-22:<https://francis.naukas.com/2008/02/27/dualidad-onda-particula-o-el-electron-como-onda-en-el-espacio-de-momentos/>
- R-23:<https://pixnio.com/es/paisajes/lluvia/agua-onda-lluvia-reflexion-luz>
- R-24:[https://www.freepik.es/vector-premium/ondas-sonido-oscilante-luz-azul-oscuro-onda-agua\\_4357659.htm](https://www.freepik.es/vector-premium/ondas-sonido-oscilante-luz-azul-oscuro-onda-agua_4357659.htm)
- R-25:<https://es.slideshare.net/gualquer/movimiento-ondulatorio-rys>
- R-26:<http://blogs.hoy.es/ciencia-facil/2013/07/16/las-ondas-electromagneticas-nos-tien-en-rodados/>

- R-27: <https://www.scientificamerican.com/espanol/noticias/descubren-ondas-gravitacionales-a-partir-de-la-colision-de-agujeros-negros/>
- R-28: <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/caracteristicas-ondas/>
- R-29: <http://vdciencia.blogspot.com/2011/09/efecte-doppler.html>
- R-30: <http://ondasluz.blogspot.com/2016/08/trabajo-de-ciencia-de-la-ondas-y-sus.html>
- R-31: <http://institutoculturaldeleon.org.mx/icl/story/6748/La-luz-blanca-y-el-espectro-electromagn-tico>
- R-32: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Llei\\_de\\_Snell](https://ca.wikipedia.org/wiki/Llei_de_Snell)
- R-33: <https://ar.pinterest.com/pin/365213851020524291/>
- R-34: [https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n\\_electromagn%C3%A9tica](https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica)
- R-35: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-18-Fenomeno-de-difraccion\\_fig13\\_323918737](https://www.researchgate.net/figure/Figura-18-Fenomeno-de-difraccion_fig13_323918737)
- R-36: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/interf.html>
- R-37: <https://www.definicionabc.com/ciencia/ionosfera.php>
- R-38: [https://es.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%B3n\\_D](https://es.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%B3n_D)
- R-39: <https://culturacientifica.com/2016/08/23/ondas-de-radio/>
- R-40: <https://blog.nuestroclima.com/inestabilidad-kelvin-helmholtz/>
- R-41: <http://giro.uml.edu/>
- R-42: [http://digisonde.com/pdf/Digisonde4DManual\\_LDI-web1-2-6.pdf](http://digisonde.com/pdf/Digisonde4DManual_LDI-web1-2-6.pdf)
- R-43: Ji, S., W. Chen, D. Weng, and Z. Wang (2015), Characteristics of equatorial plasma bubble zonal drift velocity and tilt based on Hong Kong GPS CORS network: From 2001 to 2012, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 7021–7029, doi:10.10029/2015JA021493-T. (7/1/2021)
- R-44: Vargas, F., Ch. Brum, P. Terra, and D. Gobi (2020), Mean Zonal Drift Velocities of Plasma Bubbles Estimated from Keograms of Nightglow All-Sky Images from the Brazilian Sector, Atmosphere, 11, 69, doi:10.3390/atmos11010069. (7/1/2021)
- R-45: Chapagain, N. P., M.I J. Taylor, J. J. Makela, and T. M. DulyF (2012), Equatorial plasma bubble zonal velocity using 630.0 nm airglow observations and plasma drift modeling over Ascension Island, J. Geophys. Res. Space Physics, 117, A06316, doi:10.101029/2012JA017750. (7/1/2021)
- \*Les figures 28, 31, 36, 38.1, 40.1; provenen d'una comunicació personal.



## ANNEXOS:

### 1. Dades treballades amb les quals he obtingut els gràfics:

#### a. Estació d'Ascencion Island (Atlàntic):

STA	LAT_R	LON_R	SS	DOY	MM	DD	T0(h/d)	TM(h/d)	TF(h/d)	DUR_min	DEP_mLI	Tsl	TsM	TsF	QFM	DUR
asc1	-7,95	-14,41	3	54	2	23	22,29	22,51	22,89	36	-3,7	22	22,75	23,25	220	75
asc1	-7,95	-14,41	3	55	2	24	24,27	24,43	24,58	19	-1,13	24,08	24,25	25,17	130	65
asc1	-7,95	-14,41	3	55	2	24	21,41	21,71	21,88	28,5	-1,86	21,42	21,75	21,92	140	30
asc1	-7,95	-14,41	3	59	2	28	24,1	24,21	25,07	58	-3,85	24,17	24,25	25,25	130	65
asc1	-7,95	-14,41	3	59	2	28	21,68	22,11	22,58	54,5	-3,24	21,75	22,75	22,25	120	60
asc1	-7,95	-14,41	3	60	3	1	21,35	21,92	22,32	58	-2,06	21,5	21,5	22,83	200	25
asc1	-7,95	-14,41	3	60	3	1	22,54	22,89	23,37	49,5	-3,01	23	23,17	24,08	170	65
asc1	-7,95	-14,41	4	79	3	20	20,9	21,51	22,65	105	-9,96	21,08	21,83	23,33	425	140
asc1	-7,95	-14,41	4	80	3	21	22,51	23,06	24,44	116	-10,32	22,53	23,5	24,5	215	100
asc1	-7,95	-14,41	4	82	3	23	27,98	28,17	28,28	18,5	-1,07	26,42	28,25	29,5	380	180
asc1	-7,95	-14,41	5	105	4	15	21,92	22,14	22,47	32,5	-3,1	21,5	22	22	220	30
asc1	-7,95	-14,41	5	106	4	16	22,72	22,92	23,18	27,5	-1,74	21,25	21,5	23,75	260	90
asc1	-7,95	-14,41	6	124	5	4	23,22	23,47	23,67	26,5	-1,28	23	23,25	23,75	240	60
asc1	-7,95	-14,41	13	284	10	11	22,64	22,9	23,43	47,5	-5,9	22	22,75	23,25	160	90
asc1	-7,95	-14,41	13	285	10	12	22,62	22,7	22,87	15	-1,02	23,75	24,5	24,75	125	75
asc1	-7,95	-14,41	13	286	10	13	21,42	21,92	22,43	60	-6,34	22	22	22,5	130	45

## b. Estació de Guam (Pacífic):

STA	LAT_ R	LON_ R	SS	DOY	MM	DD	T0(h/ d)	TM(h/ d)	TF(h/ d)	DUR _min	DEP_ mLI	Tsl	TsM	TsF	QFM	DUR
guam	13,5	144,87	4	78	3	19	10,8	11,32	11,49	41,5	-2,18	10,75	11,25	11,75	130	60
guam	13,5	144,87	4	78	3	19	11,97	12,21	13,03	63,5	-2,57	12,25	12,75	13,25	180	60
guam	13,5	144,87	4	78	3	19	13,35	13,43	13,82	28	-0,55	13,25	14	14,25	130	60
guam	13,5	144,87	4	78	3	19	15,42	15,51	15,79	22,5	-0,74	15,5	16,75	17,5	120	120
guam	13,5	144,87	4	79	3	20	10,4	10,98	12,55	129	-3,94	10,25	11,25	13,25	180	180
guam	13,5	144,87	4	79	3	20	13,02	13,33	14,4	82,5	-1,84	13,25	13,75	15,25	100	120
guam	13,5	144,87	4	80	3	21	10,83	11,36	11,62	47,5	-2,93	11,25	12	12,25	170	60
guam	13,5	144,87	4	80	3	21	12,51	12,72	13	29,5	-1,31	12,5	13	13,25	170	45
guam	13,5	144,87	4	81	3	22	10,49	10,62	10,91	25	-1,34	10,25	10,75	11	90	45
guam	13,5	144,87	4	81	3	22	12,65	12,81	12,92	16,5	-1,37	12,75	13,25	14,5	100	105
guam	13,5	144,87	4	81	3	22	14,92	15,13	15,38	27,5	-0,83	15,25	16,25	17,5	100	135
guam	13,5	144,87	4	82	3	23	10,79	11,18	11,58	47	-2,06	10,25	12	12,5	220	135
guam	13,5	144,87	4	82	3	23	13,5	13,71	13,83	19,5	-0,79	12,75	14	15	120	135
guam	13,5	144,87	4	83	3	24	10,28	11,78	11,94	99,5	-1,79	10	11,5	12,25	200	135
guam	13,5	144,87	4	83	3	24	11,88	12,42	12,84	57,5	-2,29	12,25	13	14,15	160	105
guam	13,5	144,87	4	83	3	24	14,88	15,28	15,59	42,5	-1,87	14,75	15,25	16,25	80	90
guam	13,5	144,87	5	100	4	10	11,02	11,59	12,06	62,5	-2,97	10,5	12	12,5	200	120
guam	13,5	144,87	5	100	4	10	12,78	13,08	13,59	49	-1,75	12,5	12,75	14	170	90
guam	13,5	144,87	5	101	4	11	10,77	10,9	11,13	21,5	-1,51	10	11	12,25	190	135
guam	13,5	144,87	5	101	4	11	11,72	12,16	12,96	74,5	-4,14	12,25	12,75	13,25	100	120
guam	13,5	144,87	5	105	4	15	11,93	12,3	12,6	40	-2,28	11	12	12,75	180	105
guam	13,5	144,87	5	105	4	15	12,68	12,88	13,14	27,5	-1,2	12,75	13,5	14,5	110	105
guam	13,5	144,87	5	106	4	16	12,38	12,51	12,82	26,5	-1,22	11,5	12,75	14,25	170	165
guam	13,5	144,87	6	126	5	6	10,77	11,01	11,22	26,5	-1,33	10	10,75	12,45	240	165
guam	13,5	144,87	6	126	5	6	14,9	14,98	15,08	11	-0,54	14,75	16,25	17,25	150	150
guam	13,5	144,87	6	128	5	8	9,9	10,08	10,33	26	-0,93	9,5	10,5	11,5	210	120
guam	13,5	144,87	7	148	5	28	12,3	12,39	12,49	11,5	-0,5	11,25	14,5	18,75	260	330
guam	13,5	144,87	10	216	8	4	10,95	11,04	11,34	23,5	-0,69	9,75	10,25	12,25	220	150
guam	13,5	144,87	10	219	8	7	10,92	11,05	11,16	14	-0,65	10,75	11,75	13,5	200	165
guam	13,5	144,87	10	219	8	7	14,45	14,56	14,65	12	-0,58	13,75	15,5	16,5	170	165
guam	13,5	144,87	11	239	8	27	9,93	10,03	10,17	14	-0,83	9,75	10,75	11,75	160	120
guam	13,5	144,87	12	261	9	18	9,38	9,98	10,28	54,5	-0,84	9,25	10	11,25	180	120
guam	13,5	144,87	12	261	9	18	11,57	11,77	11,92	20,5	-0,75	11,5	11,75	12,75	130	75
guam	13,5	144,87	12	261	9	18	13,49	13,68	13,87	22,5	-1,39	13	13,3	14,5	130	90
guam	13,5	144,87	12	261	9	18	15,32	15,42	15,52	11,5	-0,57	15,25	16	16,25	90	60
guam	13,5	144,87	12	263	9	20	10,05	10,45	10,88	50	-2,81	9,5	10	10,5	170	60
guam	13,5	144,87	12	263	9	20	11,07	11,21	11,37	18	-1,01	10,5	11	11,75	140	75

guam	13,5	144,87	12	265	9	22	9,7	10,74	11,37	100,5	-2,03	9,25	9,75	11	170	105
guam	13,5	144,87	12	265	9	22	11,1	11,2	11,46	21,5	-1,2	11,25	13	14,25	150	180
guam	13,5	144,87	12	266	9	23	9,96	10,74	10,87	54,5	-4,99	9,75	11,5	13,25	170	210
guam	13,5	144,87	13	283	10	10	11,67	11,97	12,21	32,5	-1,55	9,75	10,5	12,25	170	150
guam	13,5	144,87	13	283	10	10	12,36	12,49	12,63	16,5	-0,88	12,5	12,75	13,75	100	75
guam	13,5	144,87	13	287	10	14	10,22	10,33	10,71	29,5	-0,93	9,75	10,5	11,5	170	105
guam	13,5	144,87	13	287	10	14	15,63	15,72	15,82	11,5	-0,55	14,25	14,5	15,5	100	75
guam	13,5	144,87	13	289	10	16	10,84	11,16	11,53	41	-2,66	9,25	11	12,5	210	195
guam	13,5	144,87	13	289	10	16	12,99	13,13	13,25	15,5	-1,2	12,75	13,25	13,75	90	60
guam	13,5	144,87	14	308	11	4	11,56	11,73	11,91	21	-2,29	9	10,75	12,25	220	195

### c. Estació de Jicamarca/Arequipa (Perú):

STA	LAT_ R	LON_ R	SS	DOY	MM	DD	T0(h/ d)	TM(h/ d)	TF(h/ d)	DUR _min	DEP_ mLI	Tsl	TsM	TsF	QFM	DUR
areq	-16,36	-71,49	1	9	1	9	0,83	1,16	1,57	44	-1,64	0,75	1,25	1,75	280	75
areq	-16,36	-71,49	1	12	1	12	3,2	3,29	3,38	11	-5,34	3	3,5	4,5	370	90
areq	-16,36	-71,49	1	15	1	15	1,31	1,65	1,94	38	-1,47	0,75	1,5	2,25	400	90
areq	-16,36	-71,49	2	32	2	1	0,78	1,15	1,35	34	-1,23	1	1,5	1,75	240	60
areq	-16,36	-71,49	2	32	2	1	1,42	1,66	2,08	39,5	-0,85	1,75	2,25	3,75	380	120
areq	-16,36	-71,49	2	34	2	3	1,64	2,15	2,31	40	-1,05	1,25	2	2,75	340	105
areq	-16,36	-71,49	2	35	2	4	2,85	2,99	3,18	20	-0,95	2,75	3,25	4,5	260	105
areq	-16,36	-71,49	2	36	2	5	1,97	2,11	2,72	45,5	-1,58	1,25	1,75	2,25	290	75
areq	-16,36	-71,49	3	54	2	23	1,77	2,06	2,23	27,5	-0,66	1,5	2	2,25	140	60
areq	-16,36	-71,49	3	56	2	25	1,95	2,38	3,21	75,5	-1,62	1	1,75	2,75	360	105
areq	-16,36	-71,49	3	56	2	25	2,87	3,07	3,54	40,5	-1,32	2,75	3,25	4,5	270	105
areq	-16,36	-71,49	3	57	2	26	2,99	3,2	3,75	45,5	-2,8	1,5	2	3,5	360	120
areq	-16,36	-71,49	3	57	2	26	4,38	4,97	5,25	52	-2,78	4,25	4,5	4,5	165	30
areq	-16,36	-71,49	3	58	2	27	4,13	4,78	4,89	46	-1,52	4	4,5	5,25	140	75
areq	-16,36	-71,49	5	100	4	10	2,78	3,19	3,42	38,5	-0,74	2,25	2,75	3,5	255	75
areq	-16,36	-71,49	5	100	4	10	3,26	3,5	3,69	26	-1,58	3,5	4,5	5	220	90
areq	-16,36	-71,49	5	101	4	11	2,53	2,63	3,23	42	-1,81	0,75	1,5	2,5	360	105
areq	-16,36	-71,49	5	102	4	12	3,11	3,27	3,46	21	-2,4	1,75	2,25	3,25	315	105
areq	-16,36	-71,49	12	261	9	18	2,42	2,71	2,84	25	-0,92	2	2,5	3,5	310	105
areq	-16,36	-71,49	12	262	9	19	3,94	4,04	4,14	12	-0,75	3,25	4	5,25	220	120
areq	-16,36	-71,49	12	263	9	20	2,81	2,9	3,04	14	-0,65	1	1,5	3	320	120
areq	-16,36	-71,49	12	264	9	21	3,29	3,38	3,48	11	-0,5	0,5	1,5	3,5	335	180
areq	-16,36	-71,49	12	265	9	22	0,75	1,08	1,18	26	-1,03	0,75	1,25	1,5	200	60
areq	-16,36	-71,49	12	265	9	22	1,33	1,5	1,71	23	-1,51	1,5	2,25	2,75	165	75
areq	-16,36	-71,49	12	267	9	24	1,79	1,89	2,27	29	-1,05	1	1,5	3,75	355	165
areq	-16,36	-71,49	13	283	10	10	1,43	1,92	2,1	40	-2,04	1	1,25	2	350	60
areq	-16,36	-71,49	13	283	10	10	3,42	3,5	3,67	15	-0,71	2	2,5	3,5	260	90
areq	-16,36	-71,49	13	283	10	10	6,25	6,36	6,46	12,5	-0,79	6	7,25	7,75	195	105
areq	-16,36	-71,49	13	289	10	16	2,88	2,98	3,07	11,5	-0,55	1	2	4,5	280	210
areq	-16,36	-71,49	14	307	11	3	1,32	1,49	2,24	55,5	-1,65	0,75	1,25	3,75	325	180
areq	-16,36	-71,49	14	308	11	4	2,47	2,57	2,73	16	-0,8	1,25	2,25	2,75	280	90
areq	-16,36	-71,49	14	310	11	6	0,72	0,98	1,52	48,5	-2,38	1	1,25	1,75	250	45
areq	-16,36	-71,49	14	310	11	6	3,18	3,92	4,16	58,5	-1,55	2	3,75	5,25	300	195
areq	-16,36	-71,49	14	312	11	8	1,06	1,39	1,54	29	-0,9	0,25	1,25	3	305	165
areq	-16,36	-71,49	15	329	11	25	0,24	1,02	1,82	95	-2,33	0,5	1,25	4	320	210
areq	-16,36	-71,49	15	330	11	26	0,28	0,96	2,38	126,5	-2,24	0,5	4	7	360	390
areq	-16,36	-71,49	15	331	11	27	0,33	0,83	1,53	72,5	-2,74	0,25	3	7,25	485	420

areq	-16,36	-71,49	15	332	11	28	1,77	2,22	2,45	40,5	-0,71	0,75	1,5	5,5	390	300
areq	-16,36	-71,49	15	333	11	29	1,97	2,12	2,52	33	-1,83	0,75	1,25	6,25	470	330
areq	-16,36	-71,49	15	334	11	30	3,01	3,36	3,98	58	-2,08	0,75	2	7	455	405
areq	-16,36	-71,49	15	335	12	1	2,18	2,27	2,37	11,5	-0,78	0,75	2,25	7,25	475	390
areq	-16,36	-71,49	16	352	12	18	0,72	0,98	1,14	25,5	-1,88	0,75	2,25	8	500	435
areq	-16,36	-71,49	16	353	12	19	1,38	1,48	1,66	17	-0,67	1	3,5	8	460	420
areq	-16,36	-71,49	16	354	12	20	1,67	1,81	2,19	31,5	-1,52	1	1,5	8	450	420
areq	-16,36	-71,49	16	355	12	21	0,77	1,85	2,04	76	-1,11	0,5	2,75	8	395	450
areq	-16,36	-71,49	16	357	12	23	1,27	1,76	2,01	44	-1,42	1,25	3,45	8,25	480	420