

GEOFÍSICA

TALLER 1 - REFRACCIÓN SÍSMICA

José Gabriel Ocampo Giraldo. CC: 1037238629

Facultad de Minas, Universidad Nacional Sede Medellín

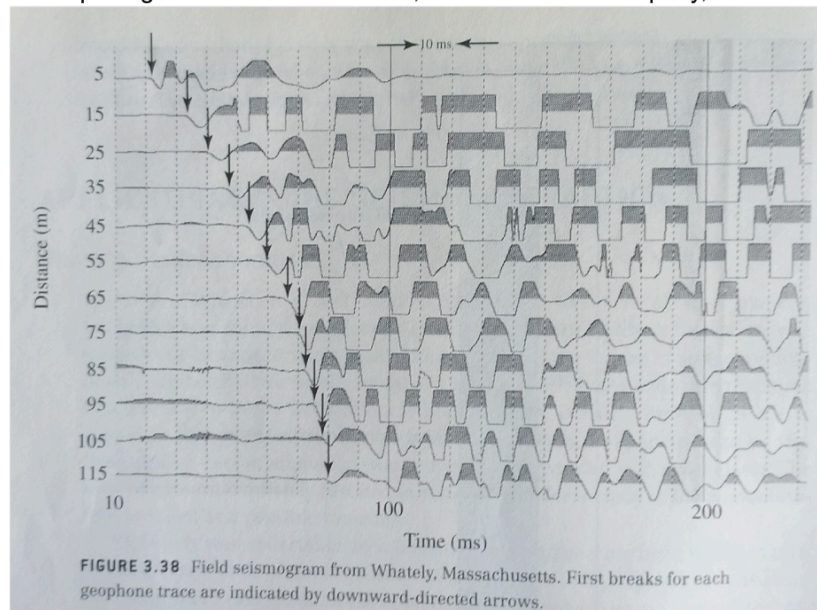
3007707: Geofísica

Gaspar Monsalve Mejia

2024 - 1

1. Elabore un diagrama t vs x con los datos de las recolecciones del registro que se muestra en la figura. Suponga que el registro es de capas horizontales. Determine el número de capas presentes, y las velocidades y el espesor de cada una (hasta donde sea posible).

Imagen tomada de Burger, H.R., Sheehan, A.F., & Jones, C.H., Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface, W.W. Norton & Company, 2006.



Los datos extraídos de los sismógrafos fueron los siguientes:

$t = [23, 33, 40, 47, 54, 60, 67, 70, 72, 74, 78, 80, 84]$

$d = [5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115, 125]$

donde,

t es igual al tiempo de llegada a los geófonos en ms y d es la distancia de los geófonos al shotpoint en m

En la **figura. 1** se pueden observar dos tendencias predominantes (dos cambios de pendiente) que sugieren, que una vez llegado el rayo a la frontera, este se refractó críticamente y generó nuevas fuentes puntuales de ondas secundarias que se refractarían con el mismo ángulo con el que incidió el primer rayo, pero en dirección hacia la superficie. Debido a que en el registro solo se observan dos cambios notorios, esto es indicativo de que el ensayo sólo identificó una frontera.

Todas las fuentes de información mantienen el ritmo de cambio bastante próximo para cada tendencia. Por lo tanto, esta información sugiere que cada tendencia puede aproximarse a una línea a través de una regresión lineal.

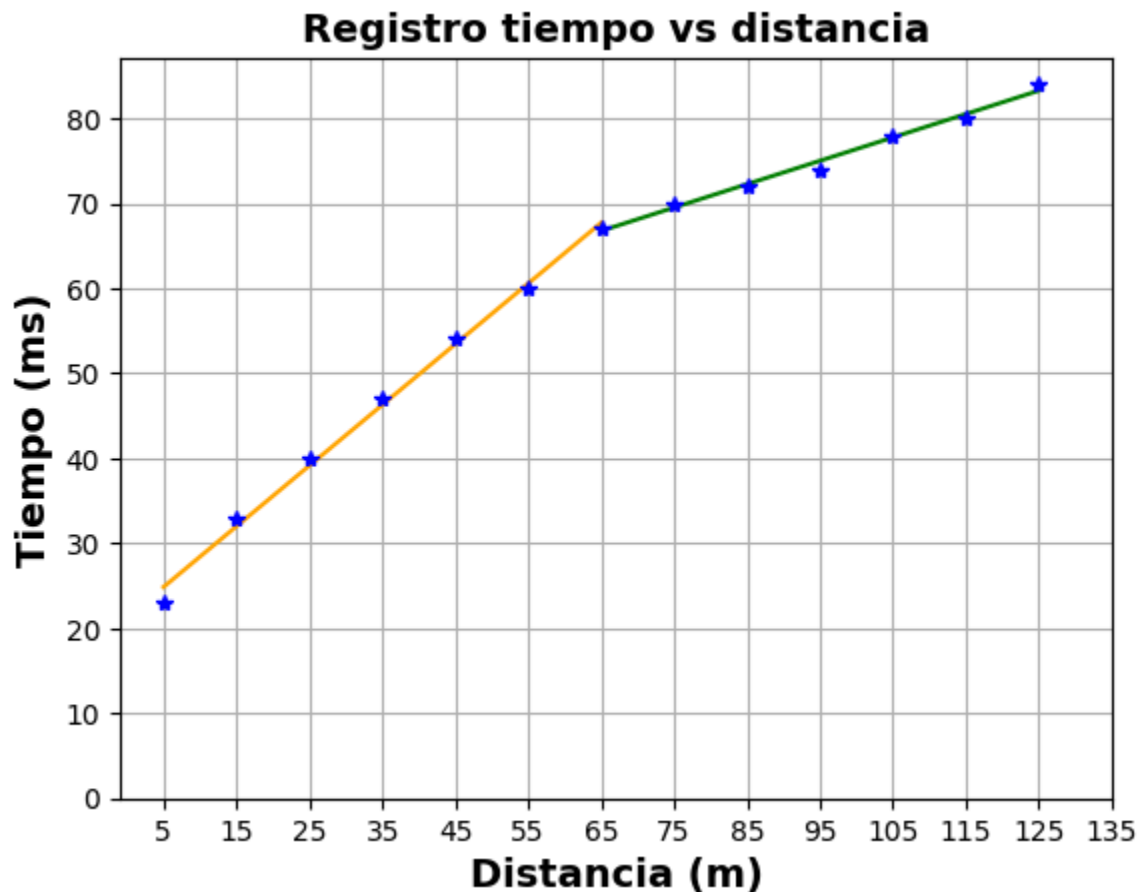


Figura 1.

Habiendo hecho la regresión lineal, se conoce tanto la pendiente como el intercepto de ambas rectas. Lo cual permite calcular fácilmente las velocidades y el espesor del estrato (**ver en anexos C/P 1**).

Los siguientes datos son los parámetros que componen las rectas que representan cada tendencia:

Pendiente de la onda directa	0.714 ms/m
Intercepto de la onda directa	21.286 ms
Pendiente de la onda críticamente refractada	0.275 ms/m

Intercepto de la onda críticamente refractada	48.875 ms
---	-----------

La velocidad se calculó como el inverso de la pendiente, ésta se debe despejar para conocer la velocidad de ambos tramos:

Velocidad de la onda directa	1.4 m/ms
Velocidad de la onda críticamente refractada	3.636 m/ms

Para determinar la altura del estrato, primero se debe determinar el ángulo crítico de refracción, el cual permite diferenciar y calcular el espesor de las capas del subsuelo. La distancia entre el SP y los geófonos, además del ángulo de incidencia del rayo refractado ayuda a determinar la profundidad entre las capas aplicando relaciones geométricas. Así, para el cálculo del espesor se puede utilizar la ley de Snell. Los valores tanto del ángulo crítico como la altura fueron los siguientes:

Ángulo crítico de refracción	22.646°
Espesor del estrato	37.071 m

El dato del espesor representa solamente el espesor de la primera capa. Debido a que la onda no se refractó más allá de la primera frontera, no es posible observar ningún registro sismográfico de una frontera más lejana, lo que podría entenderse como un cambio en la pendiente de los datos registrados. Este puede ser el resultado de una frontera inferior en la que las headwaves del rayo críticamente refractado llegan a la superficie a una distancia mayor a las del arreglo de geófonos, por lo cual se debería extender dicho arreglo en caso de necesitar mayor información del subsuelo.

Entre mayor sea el ángulo de incidencia, mayor será la profundidad desde la cual se refracta la onda por una interfaz. El ángulo de incidencia es indispensable para calcular correctamente el espesor de las unidades reflectantes en la sismica de refracción.

2. Los siguientes datos de refracción corresponden a un ensayo donde la geología consiste de capas paralelas e inclinadas. Halle el número de capas presentes, estime las velocidades sísmicas y espesores de cada una, y el ángulo de buzamiento de las capas.

Distancia desde el disparo (m)	Tiempo perfil (ms)	Tiempo contraperfil (ms)
5	8.6	6.7
10	12.9	15.8
15	21.0	17.7
20	27.6	22.8
25	36.8	26.7
30	41.9	29.9
35	49.8	33.3
40	52.2	36.0
45	53.2	37.8
50	54.6	42.8
55	57.6	46.7
60	61.4	49.8
65	64.0	51.5
70	65.9	56.3
75	67.8	60.1
80	70.6	63.5
85	74.2	65.6
90	75.0	68.1
95	78.4	74.2
100	78.0	75.9
105	78.6	78.8
110	79.3	80.0
115	80.9	79.4
120	82.5	80.9

A través de los datos suministrados por el ensayo, se pudo determinar tres tendencias predominantes tanto a perfil como en contraperfil, como puede observarse en la **figura 2**. Lo cual sugiere la existencia de dos capas, es decir, tres fronteras.

Como se puede evidenciar en la pendiente del rayo directo (Rojo), tanto perfil como contraperfil, hay un desfase en el tiempo de llegada, lo que sugiere que la frontera está inclinada, en este caso como la onda directa que tarda más tiempo en llegar es la que está en la dirección del perfil, esto indica que la frontera está más lejana de ese lado y más cercana del lado del contraperfil, por ésta razón, la primera frontera buza hacia la izquierda.

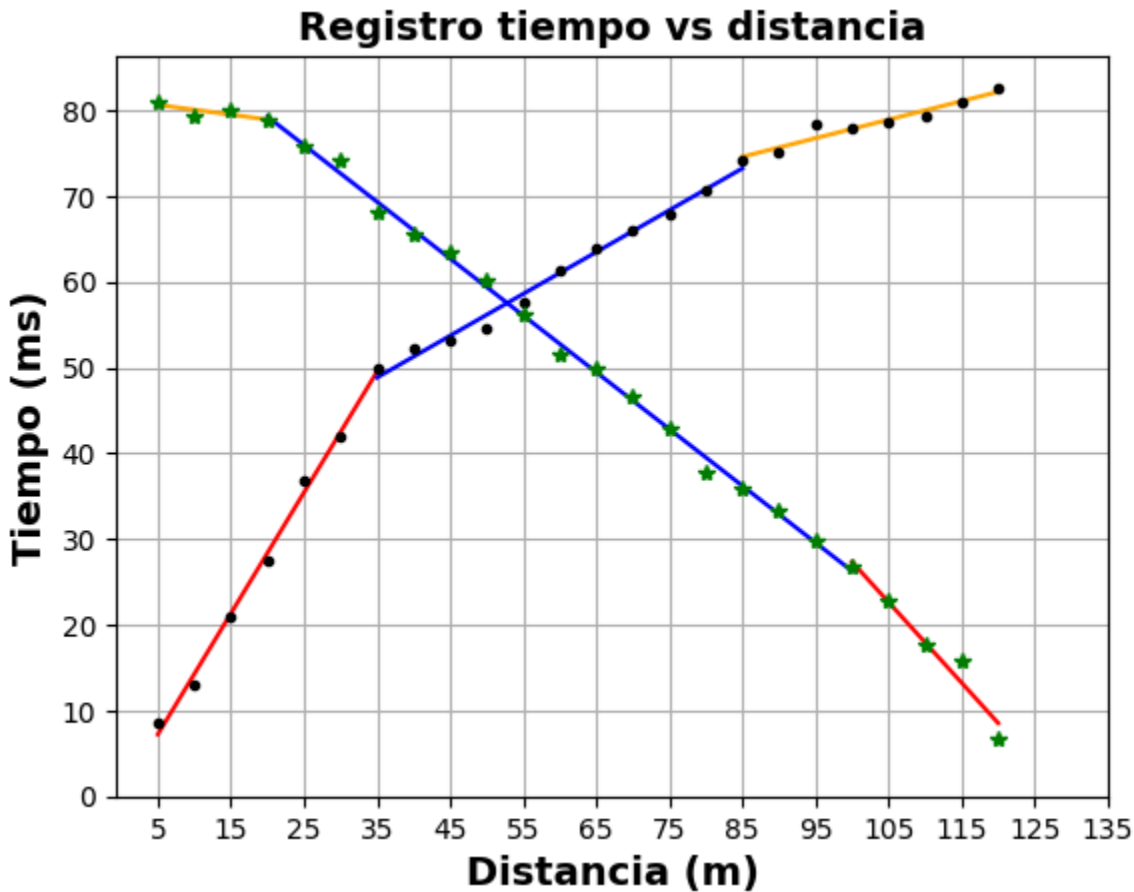


Figura 2.

Debido a que ambas fronteras son paralelas, el buzamiento tanto de la primera frontera como de la segunda serán la misma. Adicionalmente, el ángulo de incidencia críticamente refractado de la primera frontera será el mismo tanto en perfil como en contra perfil, de este mismo modo sucede con el ángulo de refracción crítica de la segunda frontera, el cual será el mismo tanto en perfil como en contra perfil. Por otro lado, el ángulo que incide sobre la primera frontera y se refracta críticamente en la segunda frontera, es diferente en perfil y contraperfil, debido a que las fronteras están inclinadas y ello afecta cómo se refracta en la primera frontera, sin embargo, el ángulo de refracción crítica en la segunda frontera se mantendrá igual.

Los resultados obtenidos para este ensayo (**ver en anexos C/P2**) fueron los siguientes:

De acuerdo a la forma como se asuman los datos o como se acoten las tendencias, pueden haber dos fronteras con buzamientos iguales o diferentes. Para efectos prácticos, se asume que las dos fronteras son paralelas.

Buzamiento de la primera y segunda frontera (θ)	6.087°
--	--------

Los datos de refracción crítica tanto en la primera frontera como en la segunda frontera en **dirección del perfil** fueron los siguientes, adicionalmente se calculó el ángulo de refracción sobre la primera frontera que es crítica en la segunda.

Refracción crítica en la Primera frontera (i11)	33.804 °
Ángulo de refracción en la primera frontera y crítica en la segunda (i12)	17.991 °
Refracción crítica en la segunda frontera (i22)	33.722 °

Del mismo modo, se hallaron los valores de los ángulos pero en **contraperfil**.

Refracción crítica en la Primera frontera (ic11)	33.804 °
Ángulo de refracción en la primera frontera y crítica en la segunda (ic12)	18.575 °
Refracción crítica en la segunda frontera (ic22)	33.722 °

Note que los ángulos de refracción crítica en la primera y segunda frontera, tanto en perfil como en contra perfil, fueron las mismas, lo que confirma que se cumple la **ley de Hyugens**. La ángulo de refracción en la primera frontera que es crítica en la segunda es diferente tanto en perfil como en contra, debido a que las fronteras están inclinadas.

Conociendo los ángulos de refracción, se pueden calcular las velocidades reales de cada una de las capas, las cuales fueron las siguientes:

Velocidad sobre la frontera 1 (v1)	0.953 m/ms
Velocidad sobre la frontera 2, (v3)	1.713 m/ms
Velocidad bajo la frontera 2 (v3)	3.085 m/ms

Por otro lado, los espesores se calcularon tanto en la zona izquierda como en la zona derecha, obteniendo así los espesores hasta cada una de las fronteras.

Espesor hasta la frontera 1 en perfil (h1')	18.205 m
Espesor hasta la frontera 2 en perfil (h2')	30.929 m
Espesor hasta la frontera 1 en Contraperfil (h1)	5.169 m
Espesor hasta la frontera 2 en Contraperfil (h2)	17.893 m

Observe que la **h1'** es mayor que **h1**, lo cual tiene sentido, pues en la **figura 2** y como se explicó anteriormente, el rayo directo en dirección perfil tarda más en llegar a los geófonos, por lo cual la frontera 1 está más alejada de este lado. De igual manera sucede para la segunda frontera.

Los espesores presentados anteriormente son la distancia que hay desde la superficie hasta la frontera, sin embargo el **espesor de la capa es diferente**. Para calcular el espesor de la capa uno debido a que está "incompleta", se promedian los valores de los espesores en ambos extremos. Y para calcular el espesor de la segunda capa, basta con **restar** el espesor de la frontera 2 con el espesor de la frontera 1, note que en ambos extremos el valor de la resta da lo mismo, lo cual indica que el espesor de la capa es constante a lo largo de la sección del ensayo.

Espesor promedio de la capa 1 (H1)	11.687 m
Espesor real de la capa 2 (H2)	12.724 m

3. Para la siguiente configuración del subsuelo elabore el gráfico de dromocrónicas (gráficos t vs x en ambos sentidos) con disparos desde ambos extremos de la línea: Se tienen 3 medios formando una estructura de capas paralelas, con velocidad constante, y contactos buzando 11° en la dirección del experimento. La longitud total del arreglo es de 230m. $V_1 = 850$ m/s, $V_2 = 1250$ m/s, $V_3 = 1800$ m/s, $h_1 = 8$ m, $h_2 = 11$ m. ¿Hay capas ocultas en el registro? (Explique)

Para los datos suministrados anteriormente, se consideró un arreglo de geófonos hasta 230 m distribuidos cada 5 metros. En este caso, se hallaron las pendientes y para cada frontera, su correspondiente h' (**ver anexos C/P3**).

Al graficar los datos anteriores, se obtuvo la siguiente gráfica (**figura 3**) de dromocrónicas, en la cual se pueden observar tres pendientes tanto en perfil como en contraperfil. Debido a que la pendiente correspondiente a la recta azul, es decir, la primera frontera, tiene una limitada aparición, se sugiere que ésta frontera y la segunda frontera, son los límites de una capa oculta.

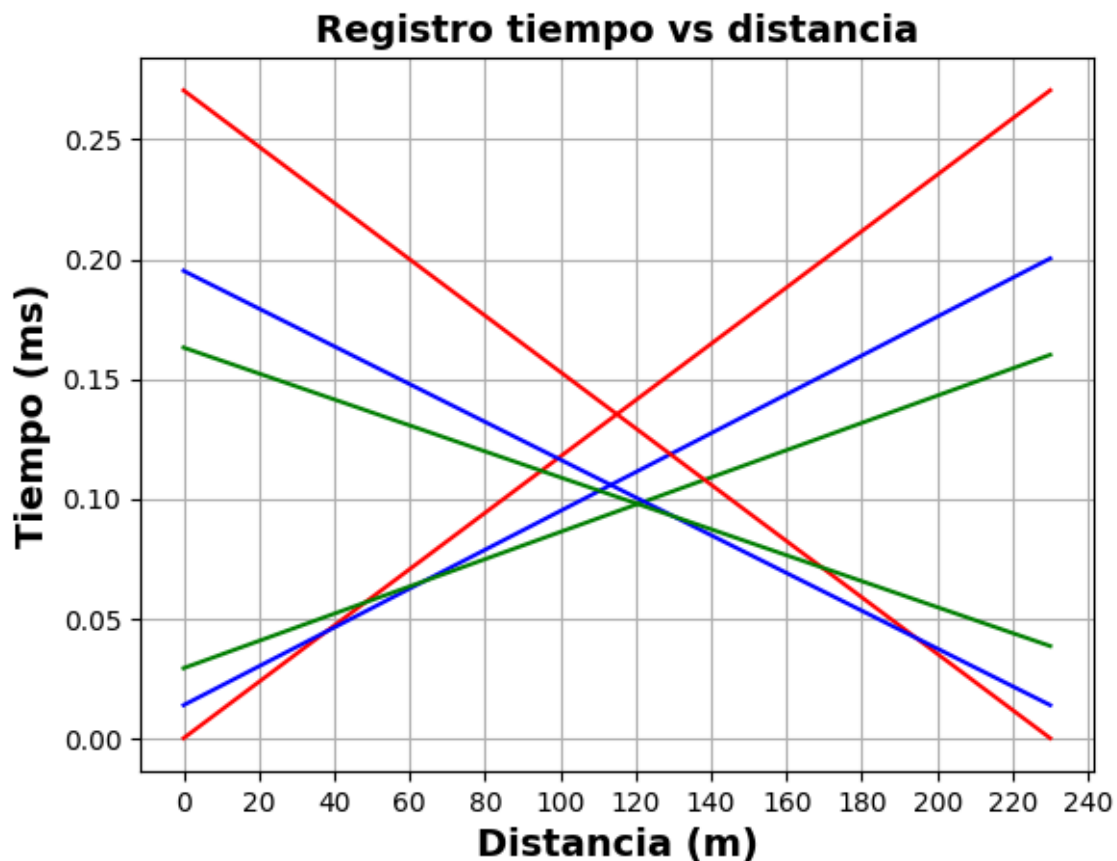


Figura 3.

Al mejorar la resolución de la gráfica y al acotar las rectas, se puede observar de mejor manera como son los cambios de velocidad (o de pendiente) en cada frontera (**ver figura 4**).

En conclusión, hay una capa delgada en la cual el intervalo de refracción es muy limitado como para que la segunda refracción llegue primero. La velocidad de esta capa no contrasta significativamente con las demás velocidades.

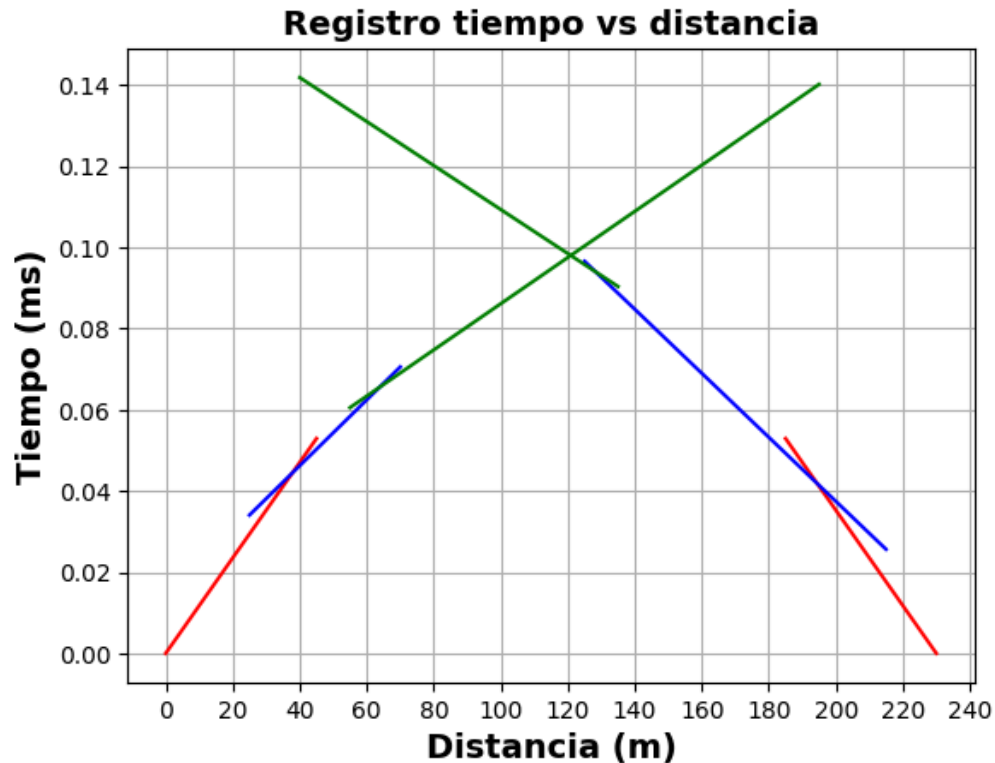


Figura 4.

4. Los siguientes datos fueron tomados a lo largo de una transecta que atraviesa un contacto vertical. Interprete la forma de la curva de tiempo de viaje y explique lo que significa. Luego determine, hasta donde sea posible, las velocidades, espesores de capas, y la localización del contacto vertical.

Distancia desde el sitio de disparo (m)	Tiempo perfil (ms)	Tiempo contraperfil (ms)
10	33.6	33.3
20	66.7	66.7
30	100	100
40	111.4	119.8
50	114.3	125.1
60	117.3	134.1
70	120.2	137
80	123.1	140
90	133.6	142.9
100	138.9	145.8
110	144.1	148.8
120	149.4	151.7

Luego de graficar los datos, tanto en perfil como en contraperfil, se obtuvieron unas tendencias representadas por una secuencia de puntos azules para el ensayo en perfil y rojo para el ensayo contraperfil como se observa en la **figura 5**.

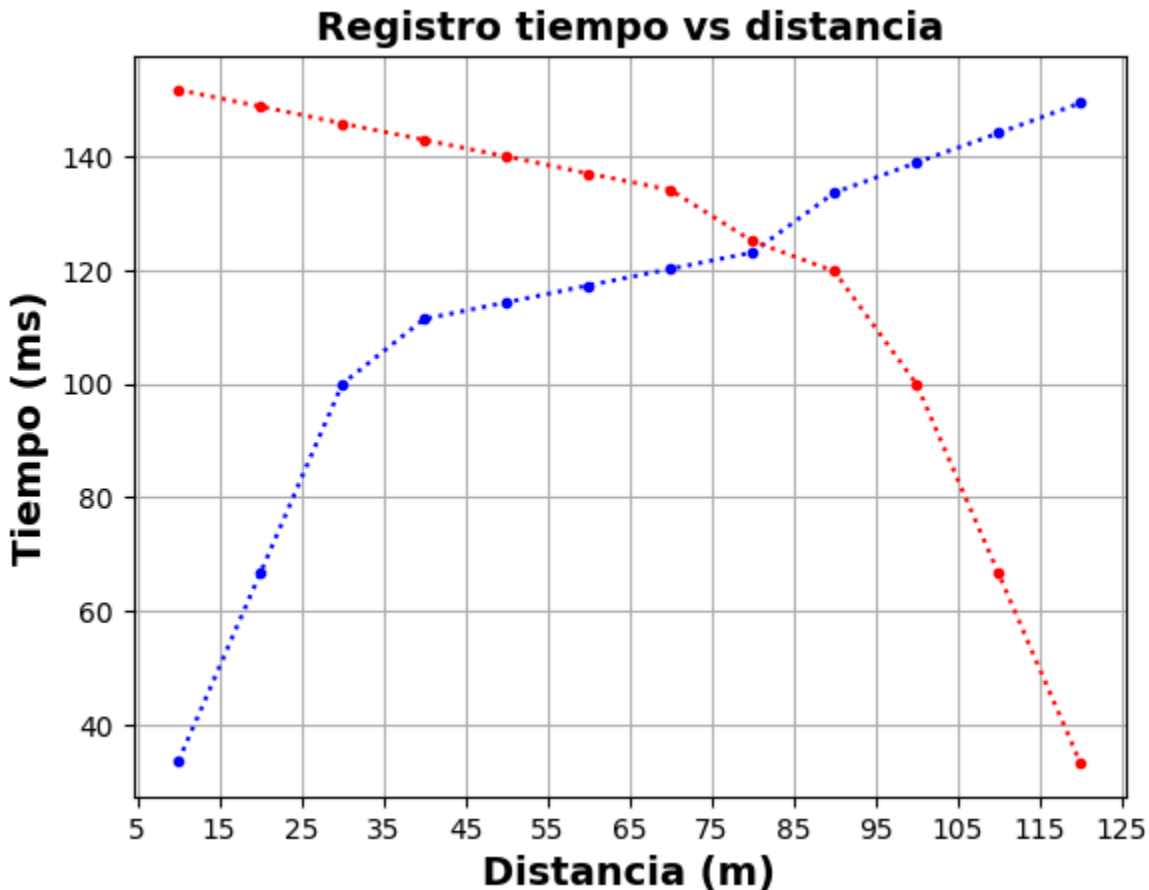


Figura 5.

Note que el comportamiento de la pendiente en la primera refracción crítica para el ensayo a perfil registró, entre los 75 y 80 metros, un aumento de la pendiente, lo que implica que hay una frontera vertical en la segunda capa la cual es una transición de un medio con mayor velocidad, a uno con menor velocidad (**ver figura 6**). Al realizar el mismo ensayo a contraperfil, las tendencias tienen un comportamiento regular, es decir, la velocidad va aumentando a medida que el rayo va avanzando. En la figura, la línea roja vertical es la frontera o límite entre los dos medios con diferentes velocidades. El código y el procedimiento se puede ver en **Anexos C/P4**.

El orden ascendente para las velocidades es como sigue: $v_1 > v_2' > v_2$, de manera tal que la trayectoria a perfil sufrió el siguiente cambio de velocidades $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_2'$. Es decir, pasó de una velocidad baja, a una alta y nuevamente a una baja.

Para la trayectoria del rayo que viajó en dirección contraperfil, el cambio de velocidades fue el siguiente $v_1 \rightarrow v_2' \rightarrow v_2$, el cual aumenta de progresivamente. lo anterior se puede dilucidar mejor en la **figura 6**.

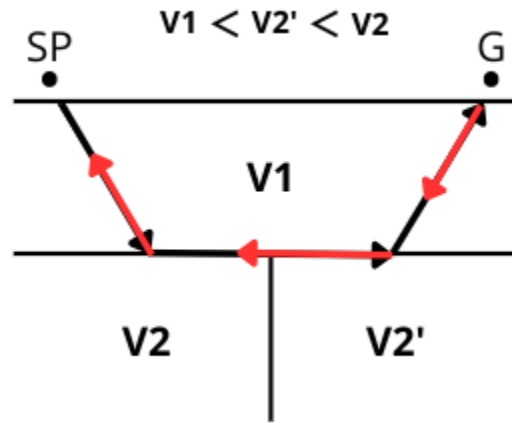


Figura 6.

Las velocidades halladas en **perfil**, fueron las siguientes y se dieron en el siguiente orden:

Velocidad de la onda directa, (v_1)	0.301 m/ms
Velocidad de contraste lateral bajo la frontera 1 (v_2)	2.815 m/ms
Velocidad de contraste lateral bajo la frontera 1 (v_2')	1.580 m/ms

Las velocidades halladas en **contraperfil**, fueron las siguientes y se dieron en el siguiente orden:

Velocidad de la onda directa (v_1)	0.3 m/ms
Velocidad de contraste lateral bajo la frontera 1 (v_2')	1.383 m/ms
Velocidad de contraste lateral bajo la frontera 1 (v_2)	3.150 m/ms

Note que las velocidades v_2' y v_2 tanto a perfil como en contra perfil son bastante similares por lo que ambas registraron el mismo cambio.

El espesor de la primera capa, dado que se considera la primera frontera horizontal, será igual tanto a perfil como contra perfil y es la siguiente:

Espesor real de la primera capa (h1)	13.783 m
---	----------

Como se pudo evidenciar en la **figura 7**, la frontera vertical se encuentra a una distancia aproximada de 75 a 80 metros del punto de disparo, pero esto por debajo de la primera frontera.

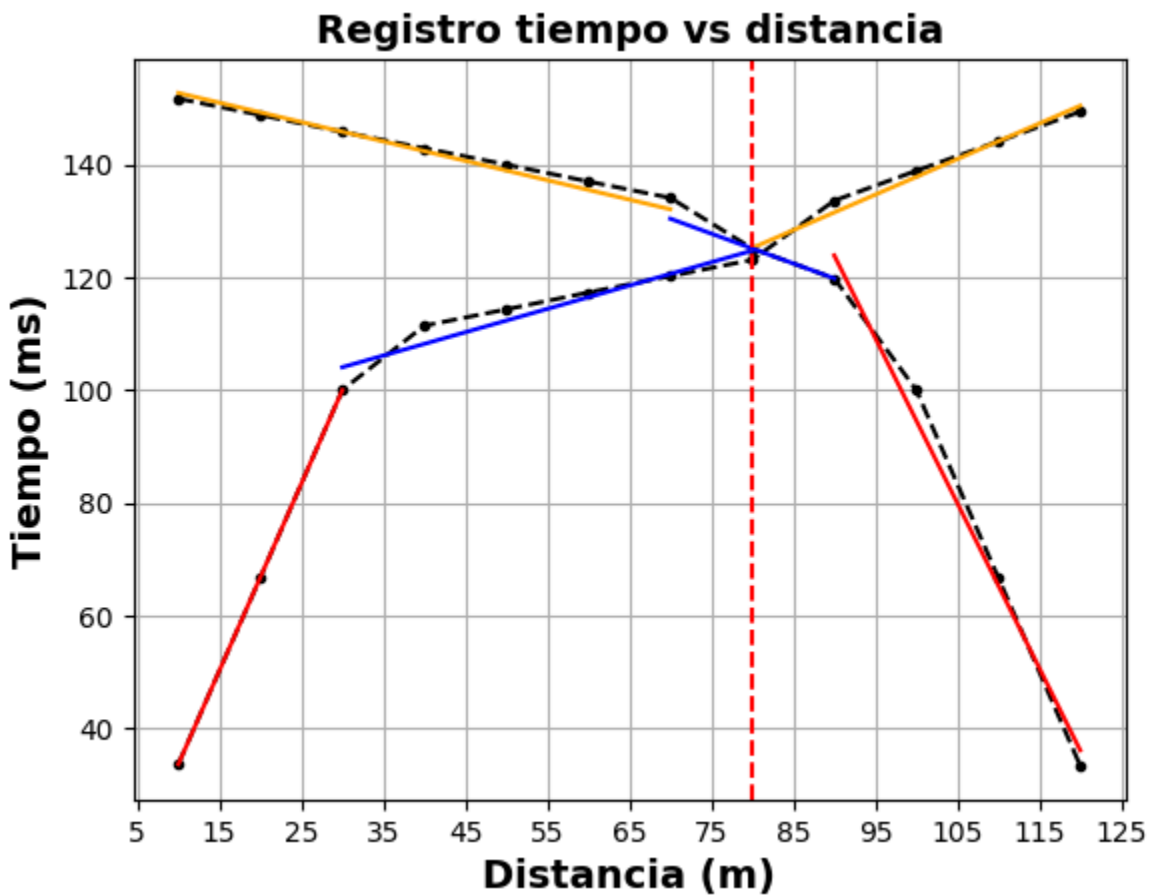


Figura 7.

ANEXOS

CÓDIGOS Y PROCEDIMIENTOS 1 (C/P1)

Con los datos de tiempo de llegada a los geófonos y de distancia entre éstos, se estiman dos tendencias para las cuales se hace el siguiente arreglo en función de calcular la regresión cuadrática para dicha tendencia.

Python

```
dwt = t[0:7] #Tomo un rango de la lista t (direct wave time = dwt)
dwd = d[0:7] #Tomo un rango de la lista d (direct wave distance = dwd)
cwt = t[6:13] #Tomo un rango de la lista t (critic refracted wave time = cwt)
cwd = d[6:13] #Tomo un rango de la lista d (critic refracted distance = cwd)
```

Usando la librería spacy se realiza la regresión lineal como sigue:

Python

```
from spacy import stats
# Realiza una regresión lineal para el primer par de datos (d,t)
slope1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(dwd, dwt)
# Realiza una regresión lineal para el segundo par de datos (d,t)
slope2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(cwd, cwt)
```

Una vez hecho esto, con los datos de las pendientes y los interceptos, se construye la ecuación de la recta para cada tendencia así:

Python

```
# y = mx + b , where m = slope1 and, b = intercept1
#The following is the line's equation for the direct wave
y1= slope1*dwd1+intercept1
#The following is the line's equation for the critical refracted wave
y2= slope2*cwd1+intercept2
```

Se sabe que el la velocidad es el inverso de la pendiente, por lo cual, las velocidades se hallan de la siguiente manera:

Python

```
#Direct wave velocity
vel1=round((1/slope1),3)
```

```
#Critically refracted wave velocity
vel2=round((1/slope2),3)
```

Por otro lado, para calcular el ángulo crítico de refracción se procedió con el siguiente código donde $\text{seni1}=\text{vel1}/\text{vel2}$:

```
Java
#i1 es el ángulo de refracción crítico.
i1 = np.arcsin(vel1/vel2)
print('Ángulo crítico de refracción:', round(np.degrees(i1),3), '°', sep=' ')
```

Ahora para conocer el espesor, se debe despejar $h1$ de: $t=x/\text{vel2} + (2h1\cos i1/\text{vel1})$ como sigue:

```
Python
h1 = (intercept2*vel1)/(2*(np.cos(i1)))
print('Espesor del estrato:', round(h1,3), 'm', sep=' ')
```

CÓDIGOS Y PROCEDIMIENTOS 2 (C/P2)

Las tendencias fueron acotadas de la siguiente manera:

```
Python
#Down-DIP
od_d1 = d[0:7]
od_t1 = t1[0:7]
oc_d1 = d[6:17]
oc_t1 = t1[6:17]
oc_d2 = d[16:24]
oc_t2 = t1[16:24]
#Up-DIP
od_du1 = d[0:7]
od_tu1 = t2[0:7]
oc_du1 = d[6:17]
oc_tu1 = t2[6:17]
oc_du2 = d[16:24]
oc_tu2 = t2[16:24]
```

Para obtener la pendiente la pendiente y el intercepto de cada una de las tendencias, se hace una regresión lineal usando la librería spacy:

Python

```
from scipy import stats
```

```
#PERFIL
```

```
mf1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(od_d1, od_t1)
mf2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(oc_d1, oc_t1)
mf3, intercept3, r_value3, p_value3, std_err3 = stats.linregress(oc_d2, oc_t2)
```

```
#CONTRA PERFIL
```

```
mc1, intercept4, r_value4, p_value4, std_err4 = stats.linregress(od_du1, od_tu1)
mc2, intercept5, r_value5, p_value5, std_err5 = stats.linregress(oc_du1, oc_tu1)
mc3, intercept6, r_value6, p_value6, std_err6 = stats.linregress(oc_du2, oc_tu2)
```

Habiendo obtenido tanto la pendiente como los interceptos, se procede a hallar las velocidades de la misma manera como se hizo en **C/P1** es decir, como el inverso de la pendiente.

Como la velocidad del rayo directo debe ser igual tanto a perfil como contra perfil, el promedio entre los dos valores obtenidos será la velocidad v_1 real, a partir de la cual se hallan otros valores como el buzamiento, el cual se calculó como sigue:

Python

```
#Buzamiento de fronteras (segun el punto, las fronteras son paralelas)
```

```
buz=0.5*(np.arcsin(v1/velu2)-np.arcsin(v1/velu2)) #MEL0 Frontera 1
```

Posteriormente, con el valor del buzamiento se puede calcular los ángulos de refracción crítica de la primera frontera tanto a perfil como contra perfil, de la misma manera, se pueden calcular los ángulos de incidencia en la primera frontera que se refractan críticamente en la segunda frontera.

Python

```
#Angulo de refracción critica de la *primera* frontera (Perfil ~ UP DIP(Contra del buza))
```

```
i11 = (np.arcsin(v1/velu2)-buz)
```

```
#Angulo de incidencia en la primera frontera y de refracción crítica en la *segunda* frontera (Perfil ~ UP DIP(Contra del buza))
```

```
i12 = np.arcsin(v1/velu3)-buz
```



```

#Angulo de la *primera* refraccion critica (Contraperfil ~ dOWN DIP(Favor del
buz))
i11c = np.arcsin(v1/veld2)+buz
#Angulo de la *segunda* refraccion critica (Contraperfil ~ dOWN DIP(Favor del
buz))
i12c = np.arcsin(v1/veld3)+buz

```

Habiendo obtenido éstos ángulos, se puede calcular fácilmente la velocidad real debajo de la primera frontera y encima de la segunda frontera, es decir, v_2 y v_3 . Posteriormente con estos datos, es posible encontrar el ángulo de refracción crítica de la segunda frontera.

```

Python
v2=v1/np.sin(i11)
v3=v1/np.sin(i12)

#Angulo de refracción critica en la *segunda* frontera (Perfil ~ UP DIP(Contra
del buz))
i22 = (np.arcsin(v2/v3))

```

Con los datos obtenidos de los procedimientos anteriores, se procede a calcular los espesores de las dos capas. Para la primera capa, se calcula la distancia hasta la primera frontera desde el lado izquierdo y desde el lado derecho, del mismo modo, se halla la distancia hasta la segunda frontera en ambos lados. El espesor de la primera capa se calcula como el promedio de las distancias hasta la primera frontera, y el espesor de la segunda capa se calcula como la diferencia entre las distancias de la segunda frontera y la primera frontera. Note:

```

Python
#Espesores del lado izquierdo (perfil)
#Hasta Frontera 1
esp_p1=(v1*intercept2)/(2*np.cos(i11))
#Hasta Frontera 2
esp_p2=esp_p1-np.sin(buz)*d[-1]

#Espesores del lado derecho (ContraPerfil)
#Hasta Frontera 1
esp_c1=(v1*intercept5)/(2*np.cos(i11))
#Hasta Frontera 2

```

```

esp_c2=esp_c1-np.sin(buz)*d[-1]

#Espesor promedio capa 1
print('Espesor promedio de la capa 1 H1 =',round((espc1+espp1)/2,3))
#Espesor real capa 2
print('Espesor real de la capa 2 H2 =',round((espp2-espp1),3))

```

CÓDIGOS Y PROCEDIMIENTOS 3 (C/P3)

Para el proceso de los cálculos, primero se buscó conocer los ángulos de incidencia y de refracción, posteriormente, se hallaron las pendientes como los inversos de las velocidades la siguiente manera:

```

Python
#Velocidades reales de las capas
v1 = 850
v2 = 1250
v3 = 1800

#Angulos de incidencia
i11=np.arcsin(v1/v2)
i12=np.arcsin(v1/v3)
i22=np.arcsin(v2/v3)

#Pendientes de las rectas
m1=1/v1*1000
m2=1/v2*1000
m3=1/v3*1000

```

La configuración y distancia de los geófonos se organizó de la siguiente manera:

```

Python
dist = []
for i in range(0, 231, 5):
    dist.append(i)

```

Las h' correspondientes para cada h_1 y h_2 , se calcularon de la siguiente manera:

Python

```
#Espesor hasta las fronteras
h1=8          #Espesor de la izquierda FRONTERA 1
h2=11         #Espesor de la izquierda FRONTERA 2
h1_d=h1+np.sin(buz)*dist[-1] #Espesor de la derecha FRONTERA 1
h2_d=h2+np.sin(buz)*dist[-1] #Espesor de la derecha FRONTERA 2
```

CÓDIGOS Y PROCEDIMIENTOS 4 (C/P4)

Las tendencias fueron acotadas de la siguiente manera:

Python

```
#Down-DIP
od_d1 = d[0:3]      #Distancias correspondientes a la onda directa Down-Dip
od_t1 = t1[0:3]     #Tiempos correspondientes a la onda directa Down-Dip
oc_d1 = d[2:8]      #Distancias correspondientes a la onda críticamente
                    #refractada Down-Dip (Frontera 2)
oc_t1 = t1[2:8]     #Tiempos correspondientes a la onda críticamente refractada
                    #Down-Dip
oc_d2 = d[7:13]     #Distancias correspondientes a la onda críticamente
                    #refractada Down-Dip (Frontera 3)
oc_t2 = t1[7:13]    #Tiempos correspondientes a la onda críticamente refractada
                    #Down-Dip

#Up-DIP
od_du1 = d[0:3]     #Distancias correspondientes a la onda directa Up-Dip
od_tu1 = t2[0:3]    #Tiempos correspondientes a la onda directa Up-Dip
oc_du1 = d[2:8]     #Distancias correspondientes a la onda críticamente
                    #refractada Up-Dip (Frontera 2)
oc_tu1 = t2[2:8]    #Tiempos correspondientes a la onda críticamente refractada
                    #Up-Dip
oc_du2 = d[7:13]    #Distancias correspondientes a la onda críticamente
                    #refractada Up-Dip (Frontera 3)
oc_tu2 = t2[7:13]   #Tiempos correspondientes a la onda críticamente
                    #refractada Up-Dip
```

Para obtener la pendiente la pendiente y el intercepto de cada una de las tendencias, se hace una regresión lineal usando la librería spacy:

Python

```
from spacy import stats
```

```
#PERFIL
```

```
mf1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(od_d1, od_t1)
mf2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(oc_d1, oc_t1)
mf3, intercept3, r_value3, p_value3, std_err3 = stats.linregress(oc_d2, oc_t2)
```

```
#CONTRA PERFIL
```

```
mc1, intercept4, r_value4, p_value4, std_err4 = stats.linregress(od_du1, od_tu1)
mc2, intercept5, r_value5, p_value5, std_err5 = stats.linregress(oc_du1, oc_tu1)
mc3, intercept6, r_value6, p_value6, std_err6 = stats.linregress(oc_du2, oc_tu2)
```

Posteriormente se calculan las tres velocidades halladas:

```
Python
```

```
#velocidad de onda directa en perfil (izquierda derecha) UP DIP
```

```
velu1=abs(round((1/mf1),3))
velu2=abs(round((1/mf2),3))
velu3=abs(round((1/mf3),3))
```

```
#velocidad de onda directa contraperfil (derecha izquierda) DOWN DIP
```

```
veld1=abs(round((1/mc1),3))
veld2=abs(round((1/mc2),3))
veld3=abs(round((1/mc3),3))
```

Después se calcula el ángulo de refracción crítica i11 con el siguiente código:

```
Python
```

```
#Angulo de refracción critica de la *primera* frontera (Perfil ~ UP DIP(Contra del buza))
```

```
i11 = (np.arcsin(v1/velu2)-buz)
```

```
#Angulo de la *primera* refraccion critica (Contraperfil ~ dOWN DIP(Favor del buza))
```

```
i11c = np.arcsin(v1/veld2)+buz
```

Por último se calcula el espesor de la primera capa:

Python

#Espesores a Perfil

#capa 1

espp1=(v1*intercept2)/(2*np.cos(i11))

#Espesores a ContraPerfil

#capa 2

espc1=(v1*intercept5)/(2*np.cos(i11))