

¿Qué pasó en Caraballeda?

El pulso de directividad no llega desfasado: **es** el tren de ondas S

Secuencia del 24 de junio de 2026, costa central de Venezuela · Cálculo sobre la traza cartografiada Puerto Cabello – San Sebastián · v1.1

1. La pregunta

Cuando se dice que la directividad «amplificó» la sacudida en Caraballeda, cabe entenderlo de dos maneras muy distintas. Una: que además del tren de ondas normal llegó, adelantado o retrasado, un pulso extra. Otra: que el propio tren de ondas llegó deformado.

La respuesta es la segunda, y conviene fijarla porque es donde casi todo el mundo se equivoca. **No hay una «onda S normal» y luego un «pulso Doppler» aparte. Hay un solo arribo S**, y la directividad decide únicamente si viene largo y flojo o corto y brutal.

2. Por qué el inicio no se mueve

Nucleación. El instante y el punto —el hipocentro— donde la ruptura *empieza* (la subfuente $\xi = 0$). No hay que confundirla con el momento de *máxima* liberación de energía, que llega después: la retroproyección, por ejemplo, localiza esos **máximos de radiación** (centroides), no la nucleación. El borde delantero de la onda S parte en la **nucleación** —por eso, como se ve enseguida, su hora de llegada no depende de lo rápido que luego avance la ruptura.

Cada punto de la falla situado a distancia ξ del hipocentro empieza a romper en el instante ξ/V_r , y la onda que emite tarda $r(\xi)/v$ en llegar al receptor. Su llegada es, por tanto:

$$T(\xi) = t_{\text{origen}} + \xi/V_r + r(\xi)/v$$

Para la subfuente $\xi = 0$ —el hipocentro mismo, la **nucleación**— el término ξ/V_r **se anula**. De donde se sigue el resultado central:

Mientras la ruptura sea más lenta que la onda, el comienzo del tren **no depende en absoluto de la velocidad de ruptura**. Lo único que la velocidad decide es cuándo llega la última subfuente, es decir, **el final**.

Lo comprobamos variando V_r sobre la geometría real de la traza, con la ruptura de 70 km del M 7,2 y $\beta = 3,5$ km/s:

V_r (km/s)	Primera llegada	Última	Duración	Procede de
1,0	53,72 s	103,98 s	50,3 s	hipocentro
2,0	53,72 s	68,98 s	15,3 s	hipocentro
2,8 (escenario B)	53,72 s	58,98 s	5,3 s	hipocentro
3,3 (USGS, escenario A)	53,72 s	55,19 s	1,5 s	hipocentro
4,5 (supershear)	49,53 s	53,72 s	4,2 s	<i>extremo de la ruptura</i>

El inicio no se mueve ni una centésima de segundo mientras V_r se cuadruplica de 1,0 a 3,3 km/s. Lo que se mueve es el final.

La directividad no adelanta el pulso: colapsa la cola contra el frente. Los 25 s que la ruptura tarda en radiar (70 km a 2,8 km/s) llegan a Caraballeda repartidos en 5,3 s. Ese factor 4,8× es exactamente el C_d : la misma energía, un quinto del tiempo, cinco veces la amplitud.

El límite del argumento

La afirmación tiene una frontera precisa, y conviene declararla. La derivada de la ecuación anterior es

$$dT/d\xi = 1/V_r - \cos \theta / v$$

que solo es positiva mientras $V_r < v / \cos \theta$. Para la onda S con $\theta \approx 2^\circ$, esa velocidad crítica vale **3,50 km/s**. Por debajo de ella el tren se ordena desde el hipocentro hacia el extremo y el inicio queda clavado; justo en ella todo llega a la vez (condición de Mach); y **por encima la ruptura adelanta a su propia onda**, de modo que la primera sacudida ya no procede del hipocentro sino del extremo lejano, y el orden se invierte.

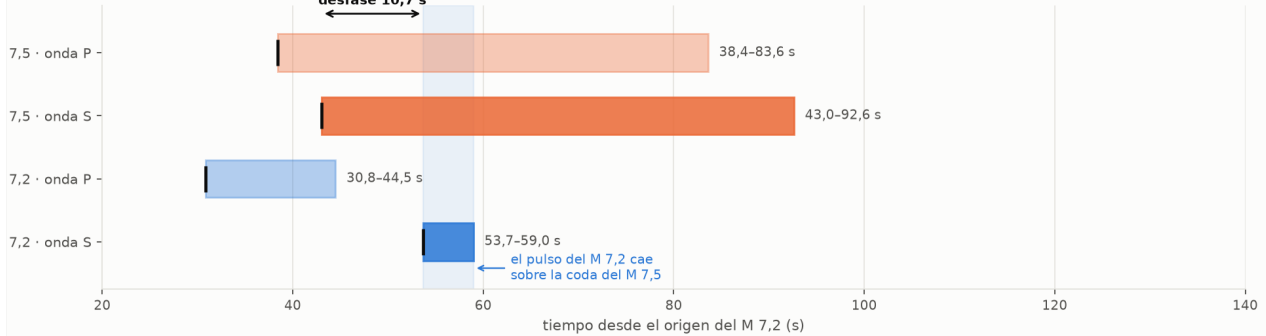
De ahí la última fila de la tabla: con 4,5 km/s la señal empieza 4,2 s **antes** que en todos los demás casos. Ese régimen —supershear— no es el de esta ruptura: con $V_r = 2,8$ km/s estamos claramente por debajo del umbral, y también lo está el 3,3 km/s que prefiere el USGS. Pero el argumento del inicio fijo vale en régimen subshear, no universalmente.

¿Qué pasó en Caraballeda?

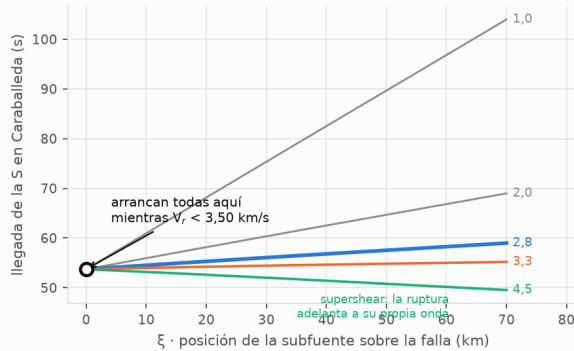
El pulso de directividad no llega desfasado respecto a la onda S: es la onda S, con su cola colapsada contra el frente.

Modelo cinemático de subfuentes sobre la traza Puerto Cabello - San Sebastián. $V_r = 2,8$ km/s salvo donde se indique; $\beta = 3,5$ km/s; foco a 10 km.

a · cronograma de llegadas en Caraballeda



b · en régimen subshear el inicio está clavado



c · Caraballeda está DENTRO de la ruptura del M 7,5

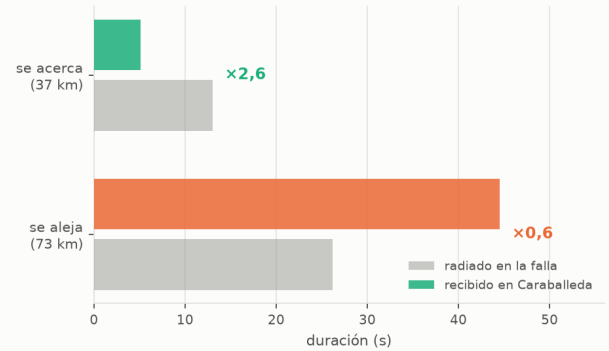


Figura 1. (a) Cronograma de llegadas en Caraballeda. Cada barra es un tren de ondas completo, de su primera a su última subfuente. El pulso comprimido del M 7,2 (5,3 s) cae sobre la coda del M 7,5, que lleva ya diez segundos sonando. (b) Llegada de cada subfuente frente a su posición sobre la falla, para distintas velocidades de ruptura: mientras V_r se mantenga bajo la velocidad crítica de 3,50 km/s todas las curvas **arrancan en el mismo punto** y solo cambia su pendiente; la de 4,5 km/s baja, porque la ruptura adelanta a su propia onda. (c) La ruptura del M 7,5 vista desde Caraballeda: los primeros 37 km se le acercan y comprimen; los 73 km restantes se alejan y estiran.

3. Lo que sí llega desfasado: el otro sismo

En Caraballeda hay **dos** sacudidas, y ahí sí hay retardo.

	Distancia	Inicio de la S	Fin	Duración
M 7,5	38 km	43,0 s	92,6 s	49,6 s
M 7,2	188 km	53,7 s	59,0 s	5,3 s

El M 7,5 golpea **primero**, 10,7 s antes. Y como su tren dura casi cincuenta segundos, **toda-vía está sonando** cuando entra el pulso comprimido del M 7,2. Se superponen: el pulso corto del sismo lejano cae encima de la coda del sismo cercano.

Los tiempos están referidos al origen del M 7,2 (24-jun-2026 22:04:31,8 UTC), que es el cero de todo este trabajo.

4. Un hallazgo que la geometría recta escondía

Al rehacer el cálculo sobre la traza cartografiada aparece algo que corrige la lectura intuitiva: **Caraballeda no está delante de la ruptura del M 7,5 — está encima de ella.**

Proyecta sobre la falla en $s = 200$ km, y el M 7,5 nuclea en $s = 164$. Es decir, queda **37 km dentro** de su propia ruptura, con **73 km que se le alejan**. Eso parte su radiación en dos regímenes opuestos:

Tramo del M 7,5	Radiación	Llega en	Efecto
Primeros 37 km — se acercan	13,0 s	5,1 s	comprime 2,6×
Restantes 73 km — se alejan	26,2 s	44,5 s	estira 0,6×

El M 7,5 le entrega a Caraballeda un pulso comprimido de unos 5 s, seguido de una cola larguísima. Y once segundos después llega el pulso de 5,3 s del M 7,2.

Dos pulsos cortos separados por 10,7 s, sobre un fondo continuo de casi un minuto. Para una estructura con período propio de segundos, eso es peor que cualquiera de los dos por separado: el segundo golpe encuentra la estructura ya en movimiento y posiblemente ya dañada.

¿Y si hubieran coincidido? (un contraste)

Los dos pulsos llegan separados **10,7 s** en Caraballeda (10,4 s en Catia La Mar). ¿Podrían haber coincidido? La separación de las dos S no la fija solo la geometría, sino la combinación $\Delta = D/\beta - (t_2 - t_1)$: el tiempo de viaje entre epicentros menos la diferencia de sus **nucleaciones**. Para cerrar ese hueco, el segundo evento tendría que haber **nucleado ~11 s más tarde**, o tener su **epicentro ~37 km más lejos** de la costa ($11 \text{ s} \times \beta$). Ambas cosas están descartadas: la onda S del M 7,5 ya está **medida en Cajigal (CARV)** a las 22:05:15,6 UTC, lo que clava su nucleación en ~32 s —no en 43—, y la retroproyección sitúa su epicentro a solo 14 km del catálogo.

Conviene subrayar de dónde salen esos ~11 s, porque es contraintuitivo: como los dos epicentros distan casi lo mismo en cualquier catálogo, el término geométrico D/β es casi idéntico (~43 s); toda la diferencia entre configuraciones la manda $t_2 - t_1$, la separación de las **nucleaciones** —no de los máximos de energía, que llegan más tarde y no deben usarse aquí—.

Pero dentro de las incertidumbres reales (localización ~15 km, datación de pocos segundos) el hueco puede encogerse a ~5 s; y como el pulso comprimido del M 7,2 dura ~5 s, eso ya es **solape casi total**. Y aunque los picos no lleguen a coincidir, los trenes S son largos: el del M 7,5 (~50 s) sigue sonando cuando entra el del M 7,2. La **conurrencia efectiva de las dos sacudidas fuertes** en el litoral es, por tanto, robusta —no exige coincidencia exacta— y es parte de por qué el daño se concentró justo ahí.

5. El mismo cálculo en las otras ciudades

La secuencia se vive de manera opuesta a un lado y otro. Al oeste llega antes el M 7,2 y con poca compresión, porque su ruptura pasa junto a esas ciudades y sigue de largo hacia el este; al este llega antes el M 7,5 y el pulso del M 7,2 se solapa con su coda.

Ciudad	S del M 7,2	Compresión	S del M 7,5	Desfase	¿Solapan?
Morón	12,1 - 33,7 s	1,2×	64,0 - 134,6 s	-51,9 s	no
Puerto Cabello	17,5 - 28,9 s	2,2×	58,3 - 128,9 s	-40,8 s	no
Valencia	19,0 - 36,2 s	1,4×	60,9 - 130,1 s	-41,9 s	no
Maracay	30,4 - 38,5 s	3,1×	49,1 - 117,4 s	-18,7 s	no
Catia La Mar	48,4 - 53,6 s	4,8×	38,0 - 98,0 s	+10,4 s	sí
Caracas	51,5 - 57,0 s	4,6×	41,7 - 94,9 s	+9,8 s	sí
Caraballeda	53,7 - 59,0 s	4,8×	43,0 - 92,6 s	+10,7 s	sí

Desfase negativo significa que el M 7,2 llegó primero.

6. Tres matices necesarios

La onda P también se comprime, pero poco. Con $\alpha = 6,1$ km/s el número de Mach es $M_r = 2,8/6,1 = 0,46$, y el factor sale 1,8×: la P llega a Caraballeda a los 30,8 s y dura 13,7 s. Por eso la directividad es esencialmente un fenómeno de ondas S: **cuanto más lenta la onda, más se apila el frente sobre ella.**

Llevado al límite, las ondas superficiales. Con Love a 3,1 km/s resulta $M_r = 0,90$ y una compresión de 9,2×; con Rayleigh a 2,9 km/s, $M_r = 0,97$ y 21×. A 188 km de distancia las superficiales están bien desarrolladas. Aviso honesto: ahí la formulación de fuente puntual **degenera** —el denominador $1 - M_r \cos \theta$ tiende a cero— y esos factores no deben tomarse al pie de la letra. Pero la dirección del efecto es firme y merece mirarse: **parte del pulso destructor pudo no ser onda S pura.**

Y lo que este cálculo NO decide. Con $L = 70$ km y $V_r = 2,8$ km/s el pulso dura 5,3 s; con los 175 km y 3,3 km/s del escenario A dura unos 3,1 s. **Ambos caen dentro de los 3-6 s observados.** Es exactamente la degeneración $L-M_r$: el período del pulso restringe el cociente $L(1-M_r)/V_r$, no cada término por separado. Lo que discrimina entre los dos escenarios sigue siendo la retroproyección, no la duración del pulso.

7. Qué se concluye

1. **El pulso de directividad no está desfasado respecto a la onda S: es la onda S.** Su inicio coincide exactamente con la llegada teórica desde el hipocentro y no depende de la velocidad de ruptura, siempre que ésta sea inferior a la velocidad crítica $v/\cos \theta = 3,50$

km/s. Por encima de ella —régimen supershear, que no es el de esta ruptura— el orden se invierte y la primera sacudida procede del extremo lejano.

2. **La compresión ocurre por detrás**, no por delante: la cola del tren se colapsa contra el frente. En Caraballeda, 25 s de radiación llegan en 5,3 s.
3. **Caraballeda recibió dos pulsos**, no uno: el del M 7,5 a los 43,0 s y el del M 7,2 a los 53,7 s, separados 10,7 s y superpuestos sobre una coda de casi un minuto.
4. **Caraballeda está dentro de la ruptura del M 7,5**, no delante de ella, de modo que solo un tercio de esa ruptura le llega comprimida.
5. La duración del pulso **no permite discriminar** entre el escenario de frente único y el de doblete. Esa discriminación la aporta la retroproyección.
6. **La coincidencia exacta de las dos S está descartada** —exigiría ~11 s de retraso o ~37 km de corrimiento, contra la S del M 7,5 ya medida en CARV—, pero la **concurrentia efectiva** de ambas sacudidas es robusta dentro de las incertidumbres y por el solape de las codas. La separación depende de las **nucleaciones** ($t_2 - t_1$), no de los máximos de energía.

Supuestos del modelo

Modelo cinemático de subfuentes sobre la traza cartografiada, con profundidad de foco fija en 10 km y velocidades corticales medias constantes: $\alpha = 6,1$, $\beta = 3,5$, Love 3,1 y Rayleigh 2,9 km/s. Ruptura unilateral hacia el este a $V_r = 2,8$ km/s, con longitudes de 70 km (M 7,2) y 110 km (M 7,5) según Wells & Coppersmith (1994). No incluye estructura de velocidades tridimensional, respuesta de sitio, ni el patrón de radiación del doble par: da **tiempos y duraciones**, no amplitudes absolutas. Los tiempos de origen empleados son **nucleaciones** (el instante en que arranca cada ruptura), no los máximos de radiación —que llegan después—; es la referencia correcta para cronometrar el borde delantero de las ondas. Los tiempos exactos de fase son los de IASP91 que emplea la sección camino-tiempo del visor.

Procedencia

Catálogo y modelo de falla finita: USGS/NEIC (D. E. Goldberg, 2026). Trazas de falla: inventario del proyecto Red_Emergencia_Vzla. Geometría de la ruptura, retroproyección y este cálculo: trabajo propio. El cronograma lo genera `web/cronograma.py` y este documento `web/gen_caraballeda.py`, a partir de `web/datos/traza_principal.json`.