

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
REGISTRO SÍSMICO OFFSHORE “3D”
ÁREAS CAN_100, CAN_108 Y CAN_114, ARGENTINA

CAPÍTULO 6 - MODELACIÓN ACÚSTICA

MARZO 2021

ÍNDICE

1	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN AGUA	3
1.1	CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO	3
1.2	MODELOS MATEMÁTICOS	9
2	UMBRALES ACÚSTICOS RELACIONADOS CON LA AFECTACIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS Y PECES	10
3	PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE SUAVE Y RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPL Y DE SEL	13
4	PARÁMETROS DE MODELIZACIÓN MATEMÁTICA Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	16
4.1	BATIMETRÍA	16
4.2	DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE	16
4.3	ÉPOCA PREVISTA PARA EL RELEVAMIENTO	16
4.4	DATOS OCEANOGRÁFICOS	16
4.5	SEDIMENTOS MARINOS	17
4.6	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN MÍNIMA	18
4.7	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	21
5	RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA SISTEMÁTICA DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN	22
6	RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL SEL	26
7	EVALUACIÓN DE DISTANCIAS PARA ALCANZAR LOS UMBRALES DE SPL	45
8	CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN ACÚSTICA (SEL) ACUMULADO	48
8.1	METODOLOGÍA	48



9	CONCLUSIONES	61
10	BIBLIOGRAFÍA	62



CAPÍTULO 6 – MODELACIÓN ACÚSTICA

El objetivo fundamental de este Capítulo es evaluar la propagación del sonido producido por las emisiones sísmicas, estimando su evolución espacial en función de sus características y de las condiciones del medio acuático y del lecho marino, a los efectos de brindar elementos de juicio que permitan realizar posteriormente la evaluación de los posibles impactos y definir las medidas de mitigación más adecuadas.

1 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN AGUA

1.1 CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Una señal sonora que se propaga a través del agua sufre diversos procesos que la debilitan.

La Pérdida por Transmisión (TL, del inglés Transmission Loss) expresa la disminución de la energía acústica o el debilitamiento de la señal a medida que se propaga por un medio, desde un punto ubicado sobre el eje acústico de la fuente, a 1 m de su “centro”, y un punto distante (a una distancia R).

La Pérdida por Transmisión incluye todos los efectos inherentes a la propagación del sonido en el mar, cada uno de los cuales es muy complejo, comprendiendo:

- a) Spreading o dispersión geométrica, que consiste en el agrandamiento del frente de onda con la distancia;
- b) atenuación, que incluye, entre otros fenómenos, a la absorción química, el scattering, la viscosidad y la filtración hacia fuera de los canales sónicos.

Las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para un cálculo aproximado de cómo la energía sonora se disipa en función de la distancia R de la fuente.

Pérdida por Expansión Esférico – Spherical Spreading

Cuando el sonido puede propagarse sin obstáculos o interacciones en forma uniforme en todas las direcciones, TL se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TL_{esferico}(dB \text{ re } 1m) = 20 \cdot \log\left(\frac{R}{1m}\right) \quad [1]$$

Pérdida por Expansión Cilíndrica–Cylindrical Spreading

Cuando la distancia $R \geq H$ (donde H es la profundidad del agua), el sonido no puede propagarse en todas las direcciones como una onda esférica, sino como una onda cilíndrica que está limitada por el fondo marino y la superficie del mar. En este caso, TL puede calcularse como:

$$TL_{cilindrico}(dB \text{ re } 1m) = 10 \cdot \log\left(\frac{R}{1m}\right) \quad [2]$$

En general, cerca de la fuente y hasta alcanzar el lecho (según sea la profundidad del agua H), en un medio homogéneo el sonido se puede propagar en forma esférica, y luego para un rango R mayor que H se puede propagar en forma cilíndrica. A modo de ejemplo, para $R = 1.000 \text{ m}$, el logaritmo es igual a 3, $TL_{esferico} = 60 \text{ dB}$, $TL_{cilindrico} = 30 \text{ dB}$.

En ciertos casos, la propagación combinada puede ser cercana a un patrón intermedio, representado por un factor 15 en la fórmula [1].



A lo largo del presente Capítulo y sus Anexos, se representarán en los gráficos los tres patrones de Pérdida por Transmisión teóricos únicamente como marco de referencia, al sólo efecto de permitir visualizar a que condiciones de transmisión geométrica se asemejan los resultados de las modelizaciones de propagación del sonido presentadas. Como se verá, en distancias menores a la profundidad de agua, las propagaciones suelen ser similares a las de tipo esférico, mientras que para distancias mayores, la tendencia se asemeja más a una propagación intermedia.

Atenuación del sonido

La atenuación del sonido se produce porque la vibración de las moléculas de agua genera calor, disipando la energía, y por otros procesos debidos a la absorción del medio, la dispersión o scattering de las ondas por las partículas en suspensión. En este proceso es irrelevante a frecuencias por debajo de 10.000 Hz (Urick, 1983).

La atenuación del sonido se suele expresar a través de la siguiente ecuación en función del rango:

$$TL_{\text{atenuación}} (\text{dB}) = - \alpha R \quad [3]$$

El coeficiente de atenuación α se expresa en dB/km y R en km.

La atenuación del sonido con la distancia es función de la frecuencia, siendo más fuerte para frecuencias altas. No obstante, la atenuación aumenta con la frecuencia en forma sensible, sólo para frecuencias mucho más altas que las empleadas en los arreglos sísmicos.

Por otro lado, estos mecanismos de atenuación no son bien conocidos para frecuencias menores a 100 Hz, como se indica en la Figura 1 (Jensen, 2011).

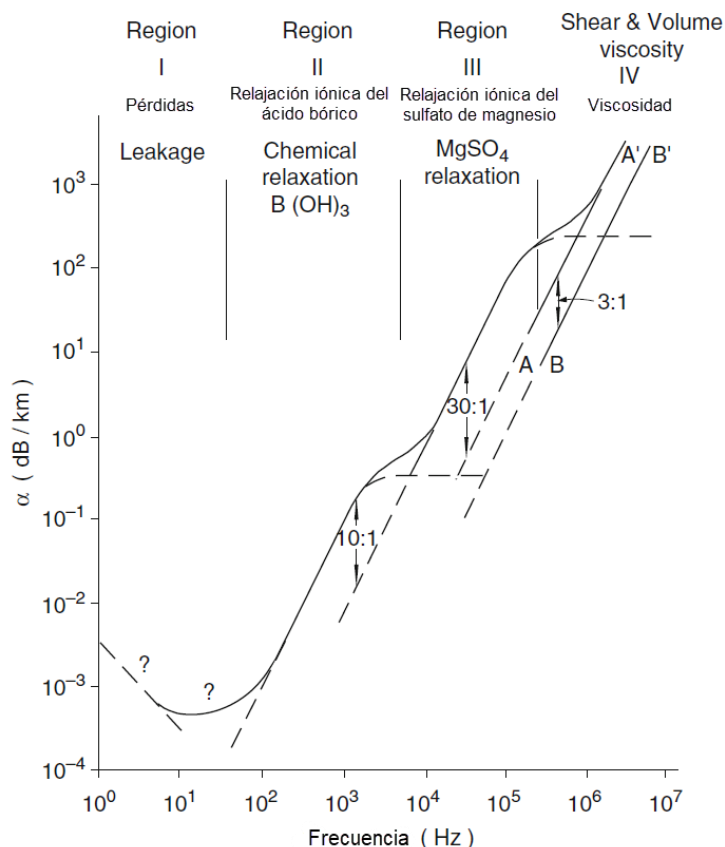


Figura 1. Regiones de los diferentes procesos dominantes de atenuación del sonido en el mar.

La viscosidad es la mayor causa de atenuación del sonido a altas frecuencias en agua marina (por encima de los 100 kHz). La relajación iónica del ácido bórico (hasta los 10 kHz) y del sulfato de magnesio (10 kHz-100 kHz) genera importantes absorciones del sonido en agua marina en estas frecuencias.

La atenuación por absorción puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \frac{S}{35} \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-z/6} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-(T/27+z/17)}$$

[4]

$f_1 = 0.78(S/35)^{1/2} e^{T/26}$ $f_2 = 42 e^{T/17}$; f [kHz], α [dB/km]

Rango de Validez: $-6 < T < 35^\circ\text{C}$ ($S=35\text{ppt}$, $pH=8$, $z=0$)
 $7.7 < pH < 8.3$ ($T=10^\circ\text{C}$, $S=35\text{ppt}$, $z=0$)
 $5 < S < 50\text{ppt}$ ($T=10^\circ\text{C}$, $pH=8$, $z=0$)
 $0 < z < 7\text{km}$ ($T=10^\circ\text{C}$, $S=35\text{ppt}$, $pH=8$)

Las condiciones típicas del área de estudio para la estación del año más conservativa (verano), corresponden a temperaturas superficiales entre aproximadamente 10° y 15°, y temperaturas en zonas profundas inferiores entre 1°C y 4°C y una salinidad media del orden de 34,5 ppt. Los valores obtenidos para una temperatura de 10°C se presentan en la Figura 2.

Recién a partir de los 1.600 Hz la atenuación por absorción comienza a ser del orden de 0,1 dB/km, y para 10 kHz ya supera 1 dB/km, con lo cual sólo su influencia para frecuencias de ese orden o superiores resulta muy significativa, no obstante lo cual a los efectos de mantener un criterio conservativo se ha considerado la atenuación para las modelizaciones de Pérdida de Transmisión efectuadas.

Dentro del rango de frecuencias de interés, las variaciones de la atenuación para salinidades y temperaturas mínimas y máximas dentro del perfil en profundidad son absolutamente despreciables a los efectos prácticos, y la consideración de una temperatura de 10°C resulta ligeramente conservativa.

Efecto espejo (Lloyd mirror)

La dependencia de la propagación con la frecuencia debido a la interferencia destructiva de ondas también forma una parte importante del proceso de debilitamiento del ruido.

Incluso las amplitudes cerca de la superficie en aguas poco profundas pueden reducirse significativamente por la interferencia con la onda superficial reflejada, efecto denominado “Lloyd mirror” (Gordon et al., 2003).

En la Figura 3 se ilustra la comparación entre el resultado del Lloyd mirror (línea llena) con la expansión esférica (línea punteada). Las tendencias de TL son proporcionales a 10 log(R⁴) en el primer caso y a 10 log(R²) en el segundo. La denominación se debe a que el rayo reflejado se representa geométricamente a través de una fuente ficticia ubicada “en espejo” por encima de la superficie del agua.



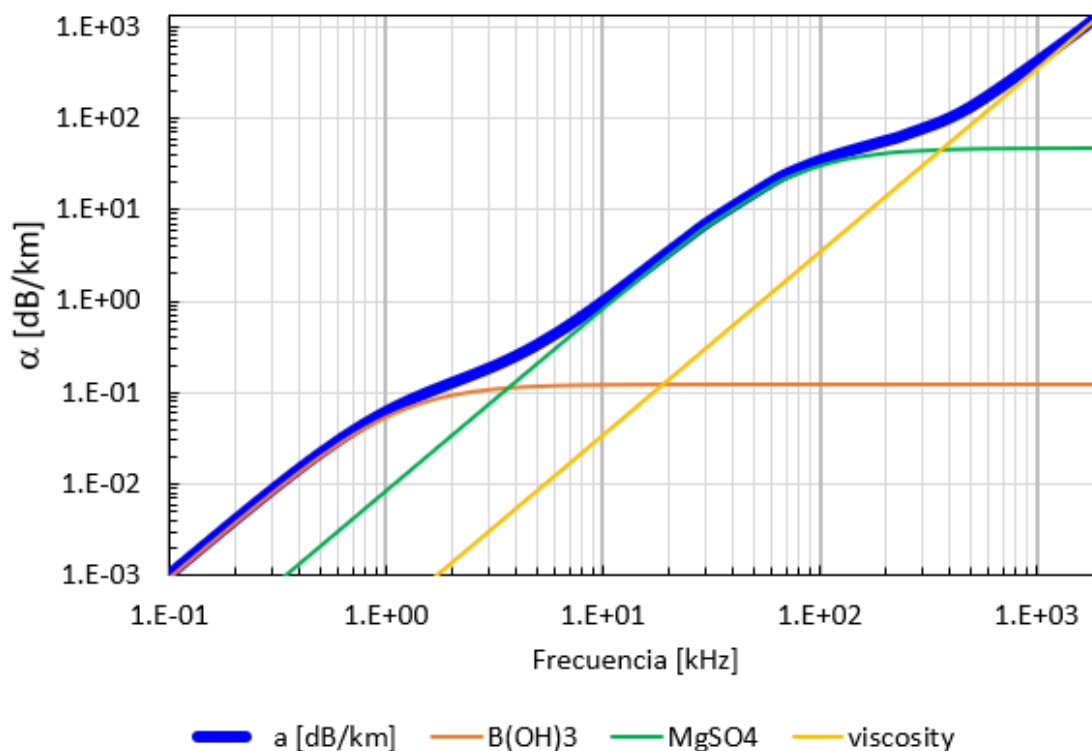


Figura 2. Pérdidas por absorción en función de la frecuencia según la dominancia del Ácido Bórico ($B(OH)_3$), moléculas de Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$) y Viscosidad.

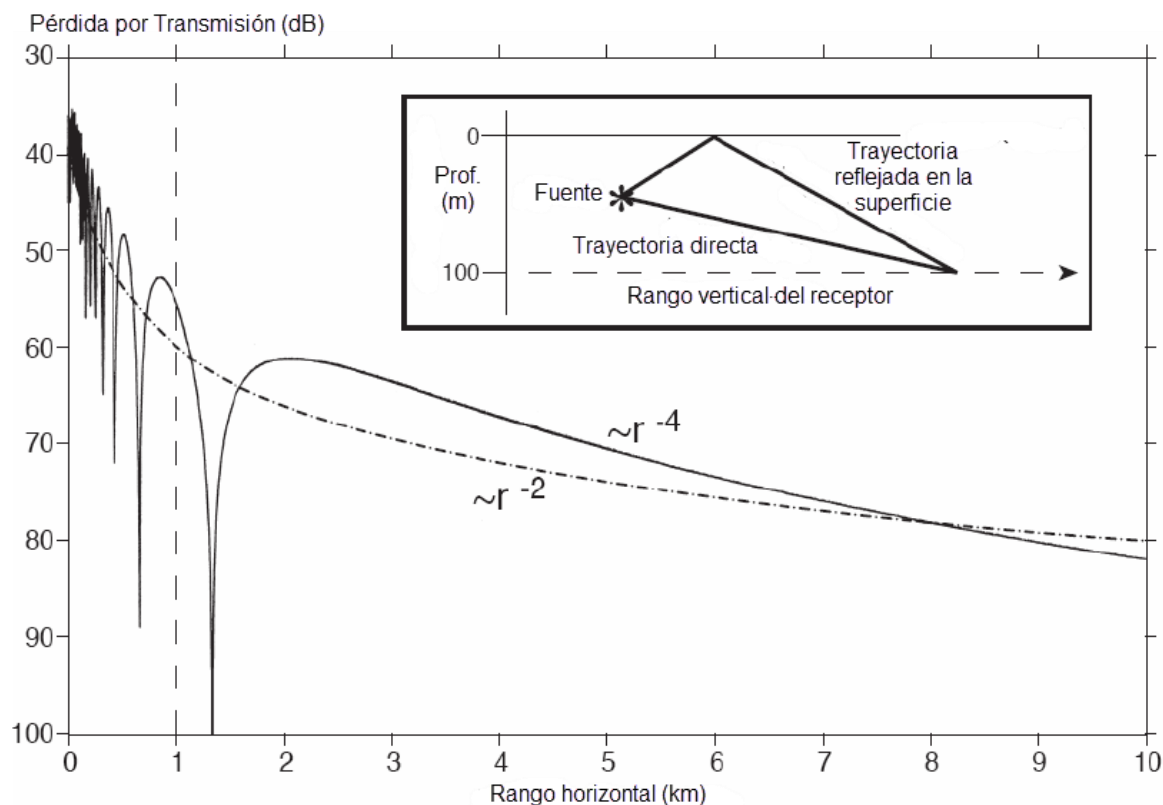


Figura 3. Efecto espejo por reflexión en la superficie. Adaptado de Kuperman (2007)

Reflexión y refracción en el lecho marino

El rebote del sonido en el fondo marino puede extender el alcance de propagación de las ondas sonoras. El efecto de estos rebotes devuelve la energía sonora que había sido llevada hasta allí por refracción a través del agua, permitiendo transmisiones de mayor alcance.

A bajas frecuencias, parte de la energía penetra en la capa de sedimentos del fondo del mar y desde aquí es refractada de nuevo a la frontera entre el agua y el fondo del mar, donde vuelve al agua. Esta refracción desde el fondo marino, que no es una reflexión, es mecanismo predominante de retorno de energía. A frecuencias medias o altas (mayores de 1000 Hz), la reflexión es el mecanismo predominante de retorno de energía ya que la onda es reflejada en la capa de sedimentos del fondo marino sin penetrar en ella.

Los principales factores que afectan a la transmisión por rebotes en el fondo son la frecuencia del sonido, la profundidad del agua, el ángulo de incidencia y la composición y relieve del fondo marino.

Canales sónicos

Un canal sónico se produce cuando se combinan dos gradientes de velocidad del sonido de igual pendiente. Uno positivo y el otro negativo.

Su confluencia se producirá en un punto de velocidad mínima. Si la fuente sonora emitiera en esta profundidad, todos los rayos sonoros que salen con un ángulo sobre la horizontal serían curvados hacia abajo y los que salen hacia abajo se curvarían hacia arriba, en esta situación simétrica un rayo que salga hacia abajo se elevará tanto por encima de la profundidad de origen como la que bajó. Cuando se produce una condición como esta se produce el canal sónico y la profundidad de mínima velocidad se denomina "eje del canal". El sonido permanecerá en el canal mientras el mismo exista y sufrirá pérdidas muy pequeñas a medida que avanza. Dado que los rayos siempre tienden a curvarse hacia la profundidad donde exista la menor velocidad de propagación, seguirán un camino oscilante que se asemeja a una onda sinusoidal. Estos canales pueden producirse en superficie, ser intermedios, de aguas poco profundas o de aguas profundas.

Dentro de los canales sónicos profundos se encuentran cáusticos y zonas de convergencia, en los cuales se propaga el sonido con muy pocas pérdidas. En un diagrama del rayo, un caustico es la envolvente formada por la intersección de rayos adyacentes. Cuando un caustico intercepta la superficie del mar, la zona donde esto sucede es conocida como zona de convergencia. Dado que la profundidad de emisión de los arreglos es muy cercana a la superficie, no se espera que se produzcan canales sónicos profundos, aunque podrían generarse canales en superficie.

Estas particularidades, que se ilustran en la figura siguiente, se revelan en las modelizaciones matemáticas de la Pérdida por Transmisión por la visualización de una zona de mínima pérdida que se produce a una profundidad dada.



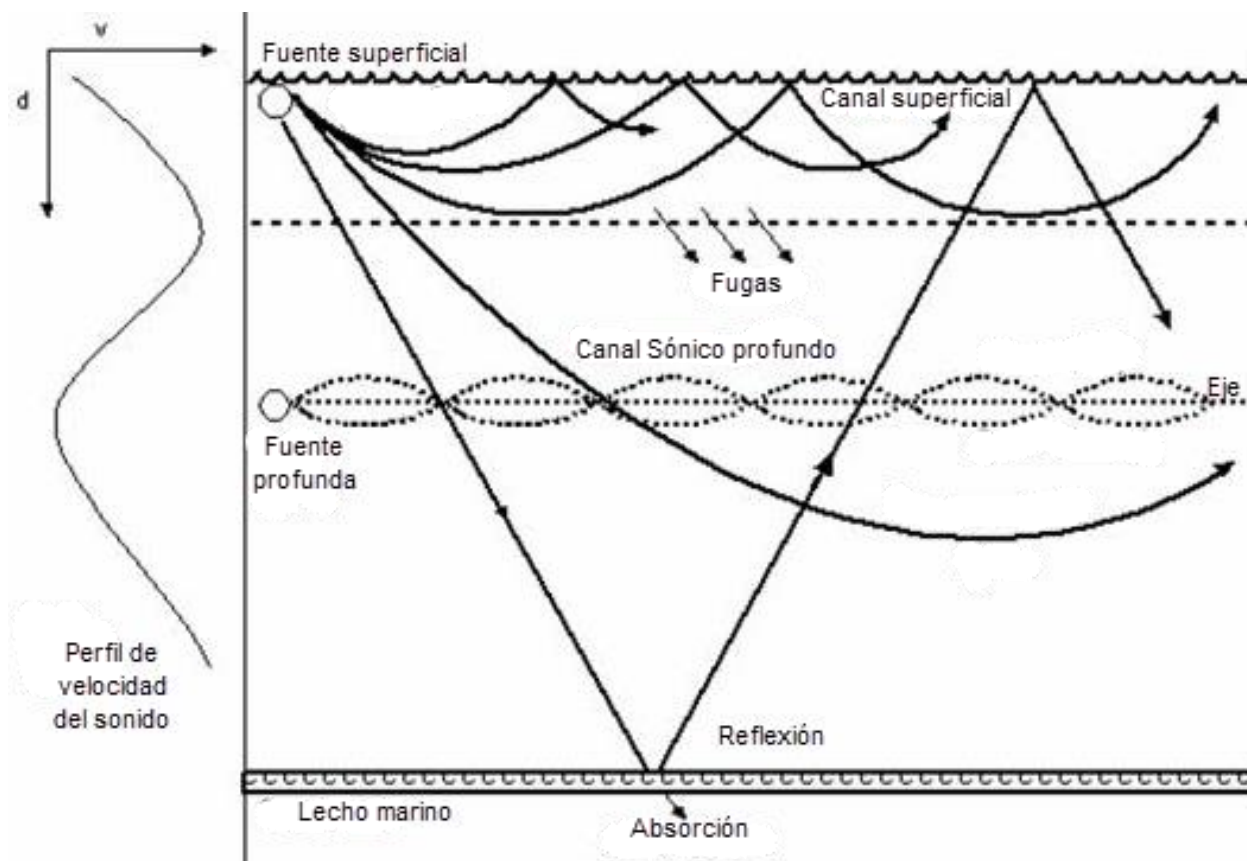


Figura 4. Canales sónicos.

Nivel recibido

A partir del espectro de energía de sonido o nivel de Exposición Sonora (SEL) para una dada frecuencia a 1 m de la fuente, denominado SL (Source Level en dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ re 1 m) y conociendo la Pérdida de Transmisión TL (R) (dB re 1 m) a una cierta distancia R de la fuente, el nivel de SEL recibido, denominado RL, se puede calcular mediante la siguiente expresión simple:

$$\text{RL (dB re } 1\mu\text{Pa}^2 \text{ s/Hz re 1 m)} = \text{SL} - \text{TL (R)} \quad [5]$$

Esta expresión es válida también para evaluar el Nivel de Presión Acústica SPL a la distancia R de la fuente, a partir del valor a 1 metro.

1.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Existen diversos modelos numéricos disponibles para el cálculo de la propagación acústica. Estos incluyen el trazado de rayos, el modo normal y los modelos de ecuación parabólica. Cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades.

Algunos modelos son más adecuados para aguas poco profundas, otros para aguas profundas, algunos pueden lidiar con complejos perfiles de batimetría, otros requieren una profundidad de agua fija, algunos devuelven perfiles de intensidad de sonido vertical a través de la columna de agua, algunos pueden manejar ondas de corte, otros no.

La elección del modelo de propagación depende del medio ambiente en cuestión. Para caracterizar una fuente con complejos componentes de frecuencia, como son los arreglos sísmicos, el modelo elegido debe ejecutarse a varias frecuencias (McCauley et al, 2000).

El documento IF-2019-95887938-APN-DIAEE#SGP, “Anexo IV: Estructura y Contenidos del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Exploración Asociados a Actividades de Adquisición Sísmica”, indica: “Respecto del impacto acústico, evaluar los impactos de la propagación del sonido y las pérdidas por transmisión, en base a la modelación numérica considerada (ej. BELLHOP Ray Beam Model, otros)”. Considerando el rango de validez del modelo de BELLHOP basado en teoría de rayos (Wang, 2014), resulta que el mismo no es aplicable, desde el punto de vista acústico en la totalidad del escenario bajo estudio, a emisiones de baja frecuencia y de aguas profundas.

El modelo empleado para la simulación acústica es el Range-Dependent Acoustic Model “RAM” (Jensen et al., 1994), el cual utiliza el método de la ecuación parabólica (PE), siendo muy efectivo para resolver problemas de acústica oceánica que dependan del rango (es decir, que sean espacialmente variables). El (RAM) es un programa que usa las últimas técnicas en modelado de PE. La interfase empleada para correr el modelo es la “Acoustic Toolbox User Interface and Post processor” (AcTUP V2.2L).

RAM utiliza un algoritmo de Padé de pasos divididos para lograr una alta eficiencia y la capacidad de modelar la propagación en ángulos grandes desde la horizontal (la limitación habitual de los códigos PE). Existe una compensación entre el rango angular y la velocidad de cálculo que se rige por la cantidad de términos que el usuario especifica para la aproximación de Padé: cuantos más términos, más amplio es el ángulo, pero más lento se ejecuta el código.

RAM es apropiado para modelar la propagación de señales de baja frecuencia en entornos totalmente dependientes del rango (es decir, batimetría y velocidad del sonido dependientes del rango) incluyendo aguas profundas. Los parámetros que ingresan al modelo se relacionan principalmente con las propiedades acústicas del medio en el cual el sonido se propaga, tanto en agua como en los sedimentos del fondo marino.



2 UMBRALES ACÚSTICOS RELACIONADOS CON LA AFECTACIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS Y PECES

En el párrafo 2.1.1 “Antecedentes de los potenciales efectos sobre la biota marina asociados a la emisión de energía sonora” del Capítulo 5 y en el punto 4 del Capítulo 7 sobre Evaluación de Impactos Ambientales se presenta en detalle el tema del impacto del sonido sobre los mamíferos marinos y peces, por lo que a los efectos de no repetir los conceptos, se hace referencia al mismo para las descripciones detalladas correspondientes.

No obstante, a los efectos de introducir adecuadamente los diferentes umbrales sonoros que pueden provocar pérdidas auditivas que son consideradas en el capítulo de evaluación de impactos, y a fin de definir las distancias sonorizadas con valores superiores a ellos, a continuación se resumen los mismos.

Estos umbrales corresponden a pérdidas auditivas de los mamíferos marinos denominadas desplazamientos de umbrales (Threshold shift, TS), que pueden ser permanentes (PTS) o temporales (TTS).

- El desplazamiento permanente del umbral (PTS) es un aumento permanente e irreversible del umbral de audibilidad a una frecuencia o porción específica del rango de audición de un individuo por encima de un nivel de referencia previamente establecido. Esto se considera una lesión auditiva.
- El desplazamiento temporal del umbral (TTS) es un aumento temporal y reversible del umbral de audibilidad a una frecuencia o porción específica del rango de audición de un individuo por encima de un nivel de referencia previamente establecido.

En el caso de los peces, se consideran los valores umbrales de sensibilidad propuestos para peces con y sin vejiga natatoria, correspondientes al nivel de mortalidad o mortalidad potencial.

Conforme a lo propuesto por Southall (2019) se considera una “métrica” dual para definir los umbrales de afectación, correspondiente a los valores de SPL pico (ecuación [1] Capítulo 4), cuyo valor total es 255,2 dB re 1μPa-m (ecuación [8] Capítulo 4), y a los valores de SEL (ecuación [4] Capítulo 4), acumulados durante un cierto período de exposición a las emisiones sonoras.

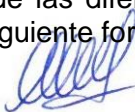
Los códigos empleados para diferenciar los grupos auditivos de los mamíferos marinos se resumen en la siguiente tabla, y se detallan en el capítulo de evaluación de impactos.

Tabla 1. Grupos auditivos con sus rangos de audición

Código	Grupo	Rango auditivo generalizado
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	7 Hz a 35 kHz
HF	Cetáceos de frecuencias altas	150 Hz a 160 kHz
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas	275 Hz a 189 kHz
PW	Carnívoros Focidos	50 Hz a 86 kHz
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	60 Hz a 39 kHz

Para estimar el SEL acumulado en las sucesivas emisiones, se “pondera” el valor del SEL emitido restando el nivel correspondiente a la capacidad auditiva de cada especie de mamíferos marinos.

Las funciones de audición (audiogramas) de las diferentes especies propuestas por el National Marine Fisheries Service (2016), tienen la siguiente forma:



$$G(f) = K + 10 \log_{10} \left[\frac{(f/f_{lo})^{2a}}{[1 + (f/f_{lo})^2]^a [1 + (f/f_{hi})^2]^b} \right] \quad [6]$$

Donde $G(f)$ es la amplitud de la función de peso (en dB) a una frecuencia f (en Hz).

Los coeficientes de la fórmula de cálculo se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 5. El rango de frecuencias donde su valor es prácticamente nulo es aquel en que la audición es óptima.

Tabla 2. Coeficientes de la formulación de cálculo de los Audiogramas por especie (Southall, 2019)

Grupo Auditivo		a	b	f_{lo} (Hz)	f_{hi} (Hz)	K(dB)
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	1,0	2,0	200	19.000	0,13
HF	Cetáceos de frecuencias altas (o “medias”)	1,6	2,0	8.800	110.000	1,20
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas (o “altas”)	1,8	2,0	12.000	140.000	1,36
PW	Carnívoros Fócidos	1,0	2,0	1.900	30.000	0,75
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	2,0	2,0	940	25.000	0,64

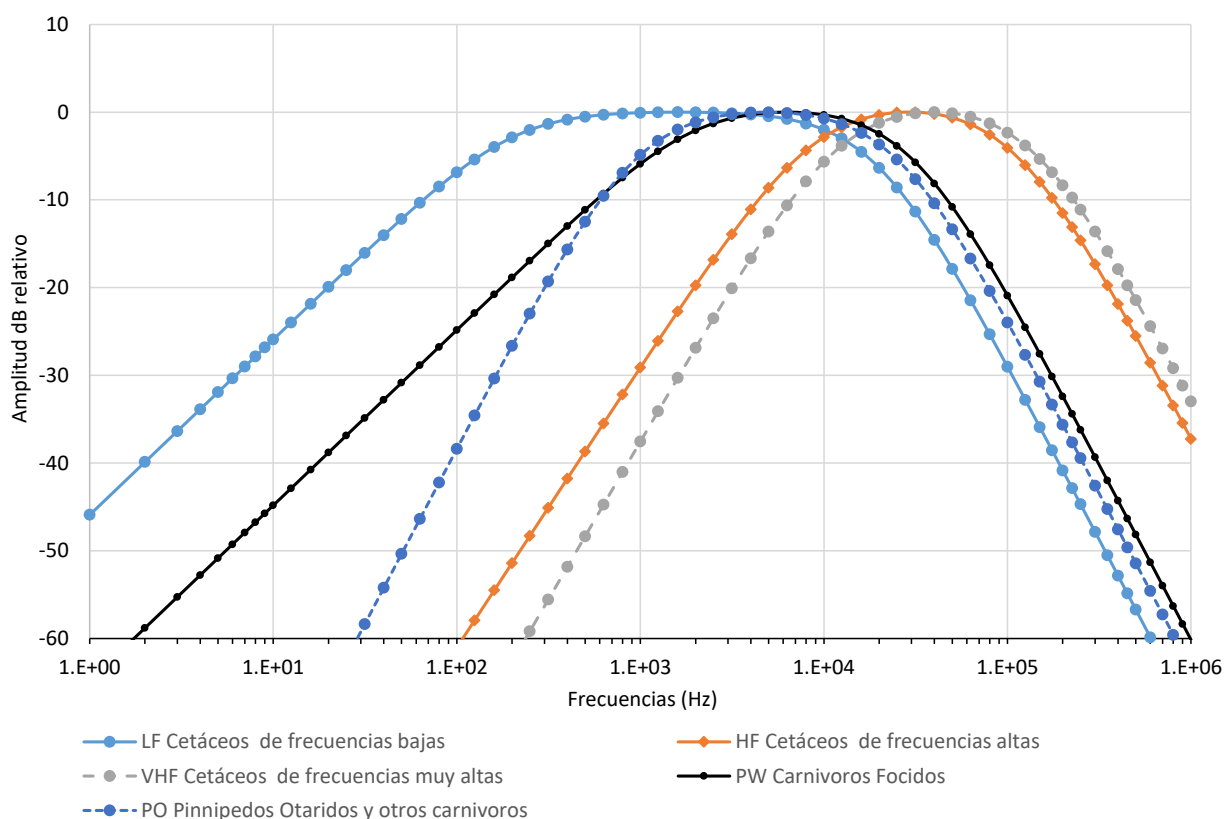


Figura 5. Funciones de peso (audiogramas) para diferentes especies

La Tabla 3 presenta los valores de sonidos a partir de los cuales se pueden verificar situaciones de impacto auditivo por corrimiento temporario (TTS) o permanente (PTS) de los umbrales auditivos. SPL pk (SPLpeak) es el criterio de exposición mínima para las lesiones en los mamíferos, nivel en el que se estima que una sola exposición causa el corrimiento de los umbrales auditivos, y SELcum se refiere a la energía sonora que se acumula durante un periodo de tiempo para un receptor con exposiciones múltiples.



Como se mencionó previamente, para fuentes móviles y de emisión intermitente se usan ambas: superar cualquiera de esos niveles es condición suficiente para predecir TTS o inicio de PTS. Estos valores también se usan para estimar distancias seguras, es decir distancias de la fuente para la cual no se supera un umbral determinado, usando la isolínea que da la distancia mayor para el conjunto de grupos que pueden ser potencialmente impactados.

Tabla 3. Niveles de PTS y TTS para los distintos grupos auditivos. Fuentes: Southall et al 2019. Para SPL (pK) se suelen usar valores no ponderados. Para SEL las ponderados son en base al rango generalizado de audición para mamíferos marinos de 7 Hz to 160 kHz. En el caso de SEL se considera una acumulación de 24 horas o durante la duración real de la exposición.

Código	Grupo auditivo	Inicio PTS		Inicio TTS	
		SPL pK ¹ (no ponderado)	SELcum ² (ponderado)	SPL pK ¹ (no ponderado)	SELcum ² (ponderado)
LF	Cetáceos de frecuencias bajas	219	183	213	168
HF	Cetáceos de frecuencias altas	230	185	224	170
VHF	Cetáceos de frecuencias muy altas	202	155	196	140
PW	Carnívoros Fócidos	218	185	212	170
PO	Pinnípedos Otáridos y otros carnívoros	232	203	226	188

¹ SPL pK (L_p,0-pk,flat) Re: 1 µPa (flat: valores sin ponderar)

² SELcum (L_E,p, 24h) Re: 1µPa²s (valores ponderados en 24 hs o durante la duración real de la exposición)

Se puede apreciar que la categoría más exigente son los cetáceos de frecuencias muy altas (VHF), si bien su rango auditivo se encuentra por encima de las frecuencias con mayor intensidad sonora emitidas durante los relevamientos sísmicos, que van de 5 a 90 Hz.

En cuanto a los peces, conforme se expresa en el parágrafo 4.3.1 “Operación de las fuentes sísmicas (emisiones de aire comprimido)” del Capítulo 7, se adoptaron los siguientes umbrales de mortalidad potencial y de recuperación (Popper et al. 2014):

Grupo Auditivo	SPL pK (dB re 1 µPa)
Peces SIN vejiga natatoria	213
Peces CON vejiga natatoria ¹	207

¹ Comprende peces con vejiga natatoria no conectada al oído y con vejiga natatoria conectada al oído

Finalmente, se cita en la bibliografía un límite convencional de afectación igual a 190 dB re 1 µPa, que será también evaluado en el estudio.



3 PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE SUAVE Y RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPL Y DE SEL

Conforme se describe en el parágrafo 2.2 “Equipamiento de emisión sonora a ser empleado” del Capítulo 4 y en el parágrafo 4.3.1 “Operación de las fuentes sísmicas (emisiones de aire comprimido)” del Capítulo 7, una de las medidas de mitigación que se aplican en las prospecciones sísmicas es el denominado “arranque suave”, que consiste en ir emitiendo el sonido incrementando lentamente el número de fuentes, a los efectos que el animal receptor tenga tiempo suficiente para alejarse del arreglo cuando este comience a emitir con su máxima potencia.

Debido a la naturaleza logarítmica del sonido y al complejo patrón de interferencia entre las fuentes individuales, la superposición del sonido al comenzar la emisión de cada fuente no genera una rampa de crecimiento lineal.

De acuerdo a las publicaciones de la industria (International Association of Oil&Gas Producers – IOGP & International Association of Geophysical Contractors - IAGC, 2017) se recomienda que, en ausencia de regulaciones o requisitos de monitoreo y mitigación específicos de la operación, se implementen las siguientes medidas durante las operaciones de levantamiento sísmico marino:

Procedimiento para el inicio de la operación:

- Implementar una zona de exclusión de mamíferos marinos de al menos 500 m de radio horizontal desde el centro del arreglo.
- Observar visualmente con operadores entrenados la zona de exclusión durante al menos 30 minutos antes de que se active la fuente sísmica:
 - Si hay mamíferos marinos dentro de la zona de exclusión definida, posponer el inicio del procedimiento de arranque suave hasta al menos 20 minutos después del último avistamiento de un mamífero marino.
 - Si no hay mamíferos marinos presentes, iniciar el procedimiento de arranque suave.

Procedimiento de arranque suave:

- La primera etapa implica la activación del elemento de volumen más pequeño en la matriz.
- Las etapas posteriores implican duplicar el número de elementos activos al comienzo de cada etapa.
- Todas las etapas deberían tener una duración de tiempo aproximadamente igual.
- La duración total del arranque suave debe ser de al menos 20 minutos, no más de 40 minutos (o según lo especificado en los requisitos reglamentarios aplicables).

Procedimiento de interrupción de operaciones en curso:

- Si las fuentes sísmicas permanecen en silencio durante 20 minutos o más, utilizar el procedimiento de arranque suave para reiniciar las operaciones.
- Si las fuentes sísmicas permanecen en silencio durante menos de 20 minutos, reiniciar las operaciones.

A los efectos de simular lo más adecuadamente posible el procedimiento de arranque suave, se calculó mediante el Software Nucleus la evolución del SPL_{peak} y del SEL con incrementos sucesivos de la cantidad de fuentes individuales energizadas, a una distancia de 9 km de la fuente (asumiendo expansión geométrica esférica), y se llevaron estos valores a una distancia teórica de 1 m de la “fuente” (el arreglo), sumando la Pérdida por Transmisión teórica correspondiente, igual a $20 \log(9000) = 79,085 \text{ dB}$.



Cabe mencionar que si se realiza el mismo cálculo con Nucleus asumiendo expansión cilíndrica, y se suma la corrección $10 \log(9000) = 59,542 \text{ dB}$, se obtienen los mismos valores.

Las figuras siguientes ilustran los valores de SPLpeak y SEL obtenidos a 9 km de distancia.

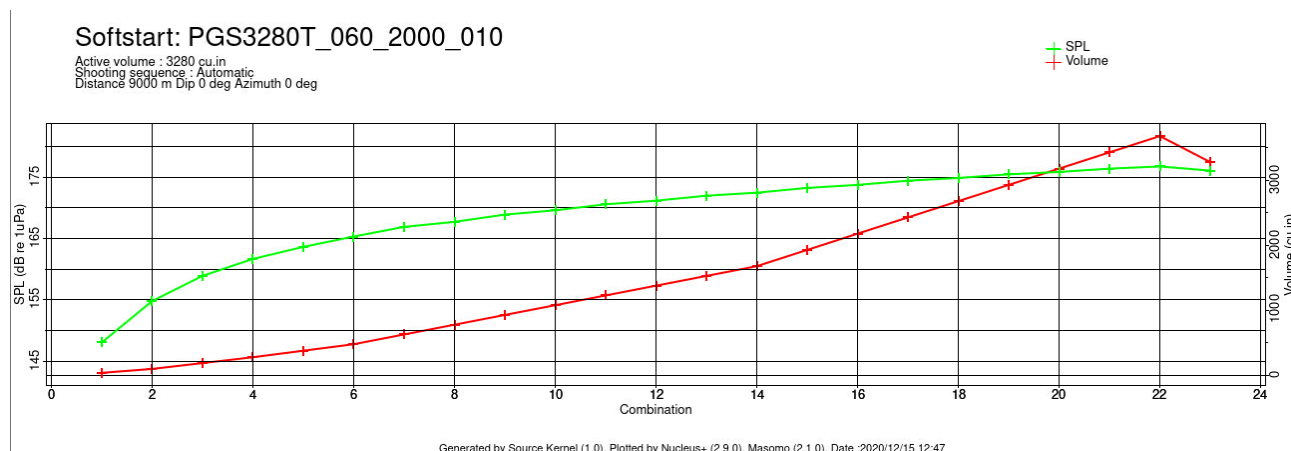


Figura 6. Evolución del volumen de emisión y del SPLpeak resultante durante el procedimiento de arranque suave

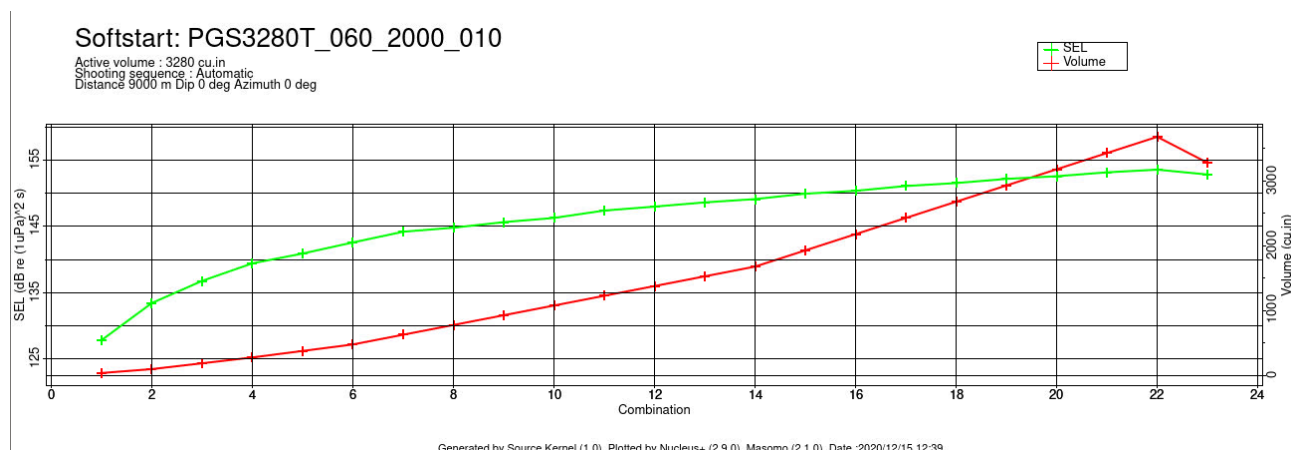


Figura 7. Evolución del volumen de emisión y del SEL resultante durante el procedimiento de arranque suave

La razón por la que el volumen se reduce en el paso o combinación N° 23 con respecto a la N° 22, es que se simula en este caso la energización de las dos fuentes de repuesto a modo de verificación de su funcionamiento, alcanzando transitoriamente un volumen de 3.680 pulgadas (60,30 litros) cúbicas de volumen, según se puede apreciar en la Figura 11 “Sub-arreglo emisor del arreglo Triple de fuentes de energía de aire comprimido. Volumen 3.280 cu.in.” del Capítulo 4. Estas dos fuentes de repuesto luego son apagadas durante la prospección.

Los resultados del software Nucleus fueron procesados para su interpretación, presentándose en la Figura 8 los valores de SEL y SPLpeak, y la diferencia entre ambos en decibeles.



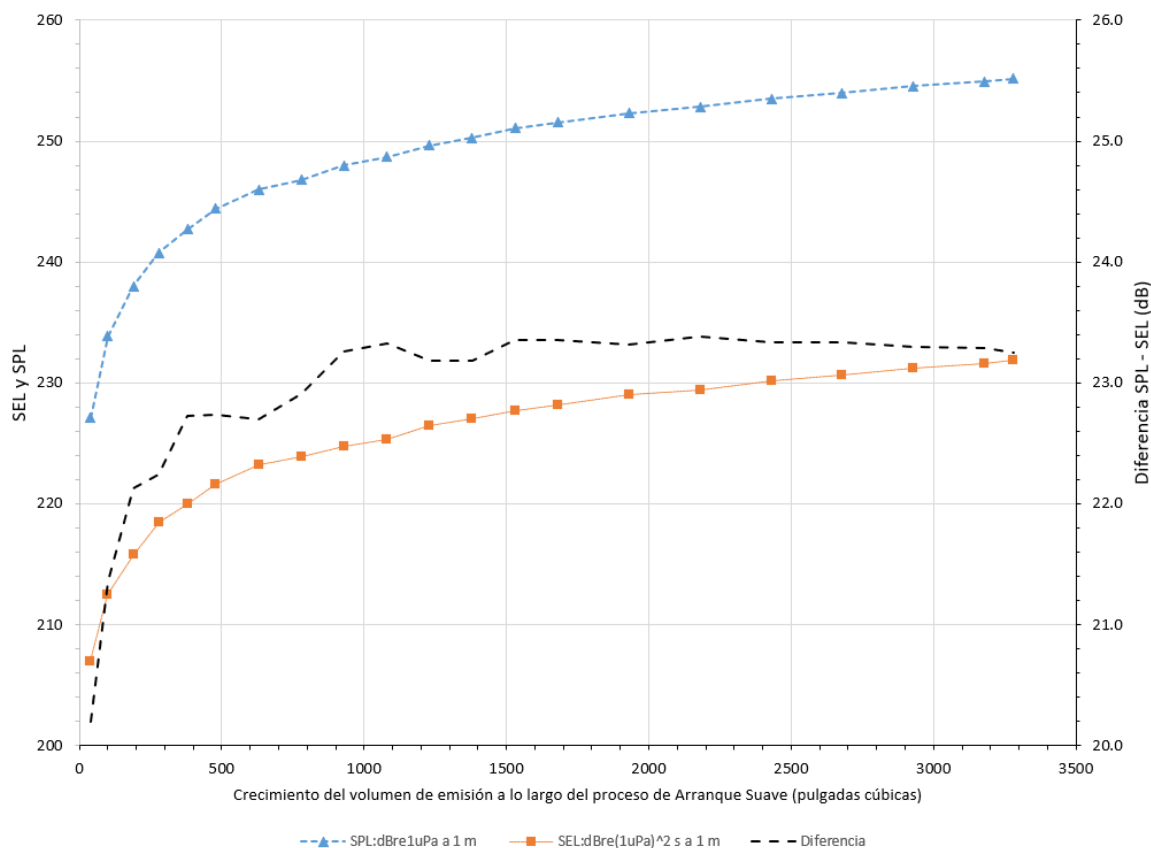


Figura 8. Evolución del SPL y SELpeak resultantes del incremento del volumen de emisión durante el procedimiento de arranque suave. Notar que las unidades de cada variable son diferentes.

Debe recordarse lo expresado en el acápite 2.9.2.1 del Capítulo 4 donde se indica que si bien las unidades del SEL y del SPLpeak son diferentes, el valor numérico del SEL es típicamente de 20 a 25 dB inferior a SPLpeak. Asimismo, el cálculo presentado en el acápite 2.9.3 del Capítulo 4 muestra que la diferencia entre el valor “nominal” del SEL total emitido verticalmente (232,0 dB re 1 μPa^2 s a 1 m), calculado integrando el espectro de energía correspondiente, y el valor total del SPLpeak calculado previamente a partir de la emisión en Bar.m del arreglo (255,2 dB re 1 μPa a 1 m), es igual a 23,2 dB.

El valor total del SEL obtenido por el software Nucleus al final del proceso de arranque suave es igual a 231,91 dB re 1 μPa^2 s a 1 m (prácticamente igual al obtenido integrando el espectro de energía), y el valor total del SPL es 255,16 dB re 1 μPa a 1 m (también prácticamente igual al que surge del cálculo con la emisión en Bar.m del arreglo). La diferencia entre ambos valores es igual a 23,25 dB al final del proceso, alcanzando un máximo de 23,36 dB en la combinación 14 cuando se han activado 1.680 cu.in de volumen.

En consecuencia, se realizará todo el proceso de propagación sonora considerando el SEL, y se estimará luego el SPLpeak incrementando conservativamente en 23 dB el valor del SEL que se obtenga para cada distancia.



4 **PARÁMETROS DE MODELIZACIÓN MATEMÁTICA Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

A continuación se presentan los parámetros del medio utilizados para las modelizaciones matemáticas. Los parámetros de emisión empleados son los presentados en el Capítulo 4 de Descripción del Proyecto.

4.1 **BATIMETRÍA**

La información batimétrica del área de modelación fue obtenida de la base de datos GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans)¹.

Se seleccionaron cinco puntos de análisis con profundidades diferentes en cada una de las zonas estudiadas (CAN_100-108 y CAN_114), los cuales se describen en los Anexos del presente capítulo, y se modelizó la pérdida de transmisión en dos transectas de batimetría variable en CAN_100-108 y una transecta en CAN_114, considerando tanto profundidades crecientes como decrecientes a partir de diferentes puntos de emisión.

4.2 **DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE**

Se especificó que el primer haz salga horizontalmente (esto es el ángulo de salida es 0°) desde la posición del arreglo, a 6 m de profundidad. Cualquier otro ángulo de salida del primer haz generará pérdidas mayores con la distancia.

4.3 **ÉPOCA PREVISTA PARA EL RELEVAMIENTO**

El presente estudio fue diseñado de manera que los resultados del mismo sean aplicables al período entre octubre y marzo, si bien como se podrá apreciar a partir de los análisis de sensibilidad, los resultados para cada mes son muy similares, por lo que podría considerarse una flexibilidad adicional en el cronograma sin que se modifiquen las conclusiones del análisis.

4.4 **DATOS OCEANOGRÁFICOS**

Como se explica en el Capítulo 5 “Línea de Base Ambiental”, las áreas CAN_100 y CAN_108 se encuentran ubicadas en la zona de la confluencia Brasil-Malvinas, en la que converge la corriente fría de Malvinas con la cálida y más salina de Brasil. La temperatura y la salinidad del agua en esta zona exhiben una alta variabilidad espacio-temporal, ya que como consecuencia de la alta dinámica de la confluencia se producen numerosos meandros y “eddies” (remolinos) de gran escala, desprendimientos de las dos corrientes que generan intrusiones de una masa de agua cálida (corriente de Brasil) en una masa de agua fría (corriente de Malvinas) y viceversa. De esta manera, estas áreas, además de estar caracterizadas por la mezcla de estas dos corrientes marinas, pueden ser bañadas tanto por las aguas frías de Malvinas como por las cálidas de Brasil.

En cambio, el área CAN_114 se encuentra al sur de la confluencia, donde las condiciones oceanográficas son más estables.

En el Anexo 1 del presente Capítulo 6 se ilustran los perfiles de temperatura y salinidad descargados de la base Copernicus, y los perfiles de velocidad del sonido y densidad del agua calculados para diferentes meses del año y 5 puntos a diferentes profundidades y ubicación geográfica, representativos del entorno de cada área, a saber:

En CAN_100-108

Se consideraron los siguientes meses del año:

¹ <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>

- Octubre y noviembre en la subzona más hacia el Norte.
- Enero, febrero y marzo en la subzona más hacia el Sur.

Se seleccionaron los siguientes puntos de análisis:

- Punto SO. Profundidad 1000 m.
- Punto SE. Profundidad 3000 m.
- Punto E. Profundidad 4000 m.
- Punto O. Profundidad 1500 m
- Punto N. Profundidad 2500 m.

En CAN_114

Se consideraron los siguientes meses del año:

- Octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero.

Se seleccionaron los siguientes puntos de análisis:

- Punto O. Profundidad 1000m.
- Punto N. Profundidad 1500 m.
- Punto E. Profundidad 3000 m.
- Punto SO. Profundidad 2000 m.
- Punto SE. Profundidad 2500 m.

4.5 SEDIMENTOS MARINOS

Los valores de las velocidades compresionales y de corte en los sedimentos y las atenuaciones del sonido tienen grandes variaciones dependiendo del tipo de sedimento de fondo. Jensen et al. (2014) ofrece una tabla con los valores característicos de las propiedades geoacústicas de los sedimentos de fondo que se encuentran en lechos marinos y plataformas continentales, la cual se incluye en los Análisis de Sensibilidad que se presentan en el Anexo 2 para CAN_100-108 y en el Anexo 3 para CAN_114.

Los parámetros característicos son: p : porosidad (%), ρ_b/ρ_w : densidad del sedimento sobre densidad del agua ($\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$), C_p/C_w : Velocidad compresional sobre velocidad del sonido media en agua ($C_w=1500 \text{ m/s}$), C_p : velocidad compresional, C_s =Velocidad de corte, α_p : Atenuación asociada a la onda compresional, α_s : Atenuación asociada a la onda de corte. Para limos, arenas y gravas el valor de C_s depende del espesor z de la capa superficial de sedimentos.

Los datos de sedimentos del fondo marino se obtuvieron del Atlas de Sensibilidad Ambiental de la Costa y el Mar Argentino (2008), así como de testigos de fondo extraídos en la zona de interés, información que fuera presentada en el Capítulo 5 “Línea de Base Ambiental” del presente estudio.

De acuerdo a lo presentado en el Capítulo 5, la unidad sismoestratigráfica más reciente se extiende desde el borde exterior de plataforma (y aún sectores del talud) hasta las llanuras costeras, estando limitada en su base por la superficie transgresiva mientras que su tope está representado por la superficie topográfica actual. Su espesor promedia los 5 a 10 m, siendo mayor en la plataforma bonaerense donde llega a 10-15 m y menor en la patagónica donde generalmente no excede los 5 m, teniendo aquí una distribución discontinua (Urien y Ewing 1974, Parker et al. 1996, 1997, Urien et al. 2003; citado por Violante et al., 2014).

De acuerdo al Atlas de Sensibilidad Ambiental de la Costa y el Mar Argentino (2008), en las áreas de exploración el material predominante es fango, aunque en la zona oeste de CAN_100-108 se encuentran arenas. Por otro lado, testigos de fondo de 10 m de longitud extraídos en sectores profundos cercanos a las áreas de exploración evidencian la presencia de arcillas.

De acuerdo a toda esta información, en esta zona se adoptó inicialmente un espesor $z = 15$ metros de fangos para el cálculo de la velocidad de corte C_s . Los análisis de sensibilidad que se presentan en Anexos muestran que los resultados de la Pérdida de Transmisión son poco dependientes del valor de este parámetro, pero resulta ligeramente más conservativo reducirlo a 10 metros.

En cuanto a los sedimentos que se encuentran por debajo de esta capa superficial, aunque la información sobre las características de estos materiales es escasa (Capítulo 5), se ha verificado que resulta más conservativo considerarlos ya que su presencia reduce la pérdida de transmisión en el medio acuático, debido al segundo “rebote” del sonido en la interfase entre los dos materiales.

Considerando que la mayor parte de la zona tendría fangos sobre arena limosa y que sería probable encontrar grava en los sectores de los “cañones” sumergidos y en cuerpos contorníticos, se analizaron dos tipos de materiales subyacentes, arena y grava, y se realizaron análisis de sensibilidad al espesor y otros parámetros de los sedimentos en ambas capas.

4.6 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN MÍNIMA

Las simulaciones efectuadas con el modelo RAM generan matrices bidimensionales de TL, con espaciamentos Dz y Dx en las dimensiones vertical (z) y horizontal (x), respectivamente.

En todos los casos, se consideró $Dz = 1$ m, mientras que en la dirección horizontal también se empleó $Dx = 1$ m en general, aunque de acuerdo a la frecuencia en algunos casos se consideró un valor de Dx algo mayor y luego se interpolaron los resultados cada 1 metro para uniformizar la longitud de las series.

En la dirección vertical dentro del agua la cantidad de puntos es igual a la profundidad. En la dirección horizontal se modelaron 25.500 metros, con lo cual se tiene igual número de puntos con resultados de TL. Sin embargo para evitar efectos de “borde” se consideraron sólo los primeros 25.000 metros desde la fuente para las comparaciones de sensibilidad y los cálculos siguientes de acumulación del SEL.

Se cuenta entonces para analizar una matriz resultante $TL(z,x)$ con dimensiones $(P, 25.000)$, donde P es la profundidad de agua en el dominio de modelación (la cual puede ser un valor uniforme o bien el valor máximo de $P(x)$ en caso de batimetría variable)

La **Figura 9** ilustra un resultado típico bidimensional para el punto SO-1000 con perfil oceanográfico de Enero para una frecuencia de 80 Hz. La **Figura 10** muestra los procesamientos de la matriz para obtener el mínimo TL en vertical (denominado $TL_V(x)$) y luego el mínimo TL también en función de la distancia horizontal (denominado $TL_{V,H}(x)$), que finalmente se presenta en la **Figura 11**.

El valor de $TL_V(x)$ muestra la variabilidad del valor mínimo de TL en toda la columna de agua para una dada distancia “ x ” a la fuente, por lo tanto, no se refiere a una profundidad o capa en particular, sino que es el valor más pequeño que pueda hallarse en cualquier profundidad entre la superficie y el lecho, lo cual claramente es la hipótesis más conservativa posible.



El valor de $TL_{V,H}(x)$ elimina las oscilaciones que se aprecian en $TL_V(x)$, generando una envolvente “superior” que representa el valor más bajo (conservativo) de TL que puede encontrarse para cada distancia “x” desde la fuente, desde esa distancia “x” en adelante, hasta los 25.000 m.

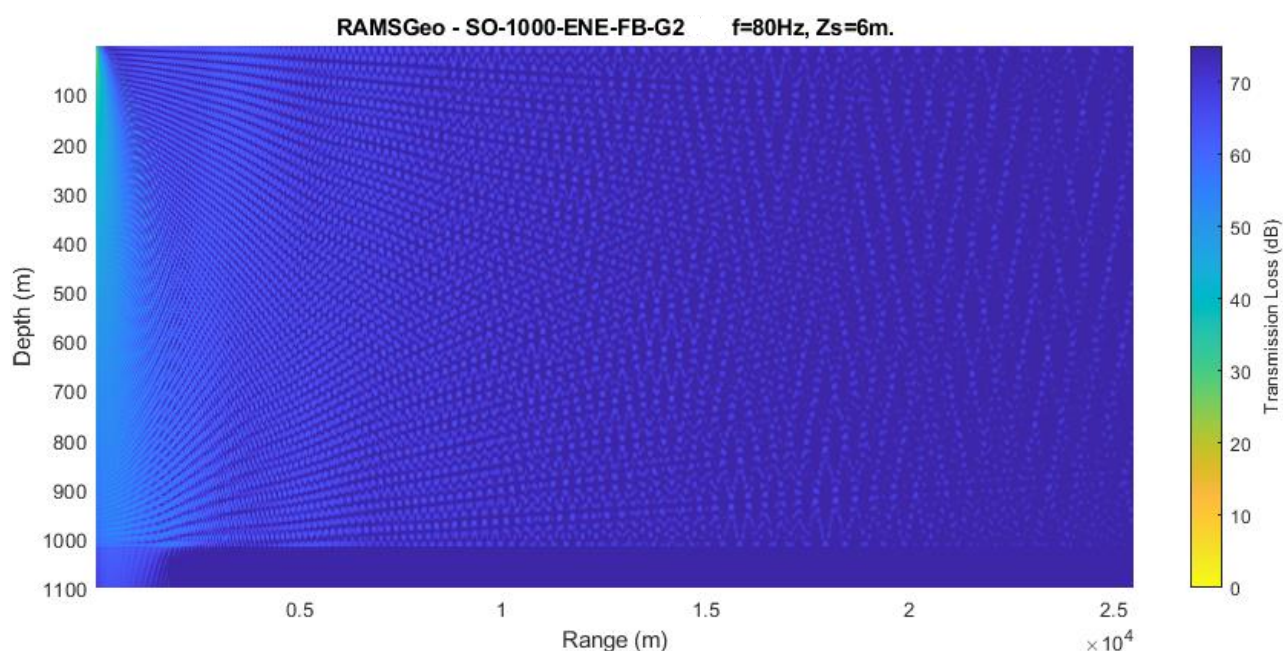


Figura 9. Ejemplo de matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM

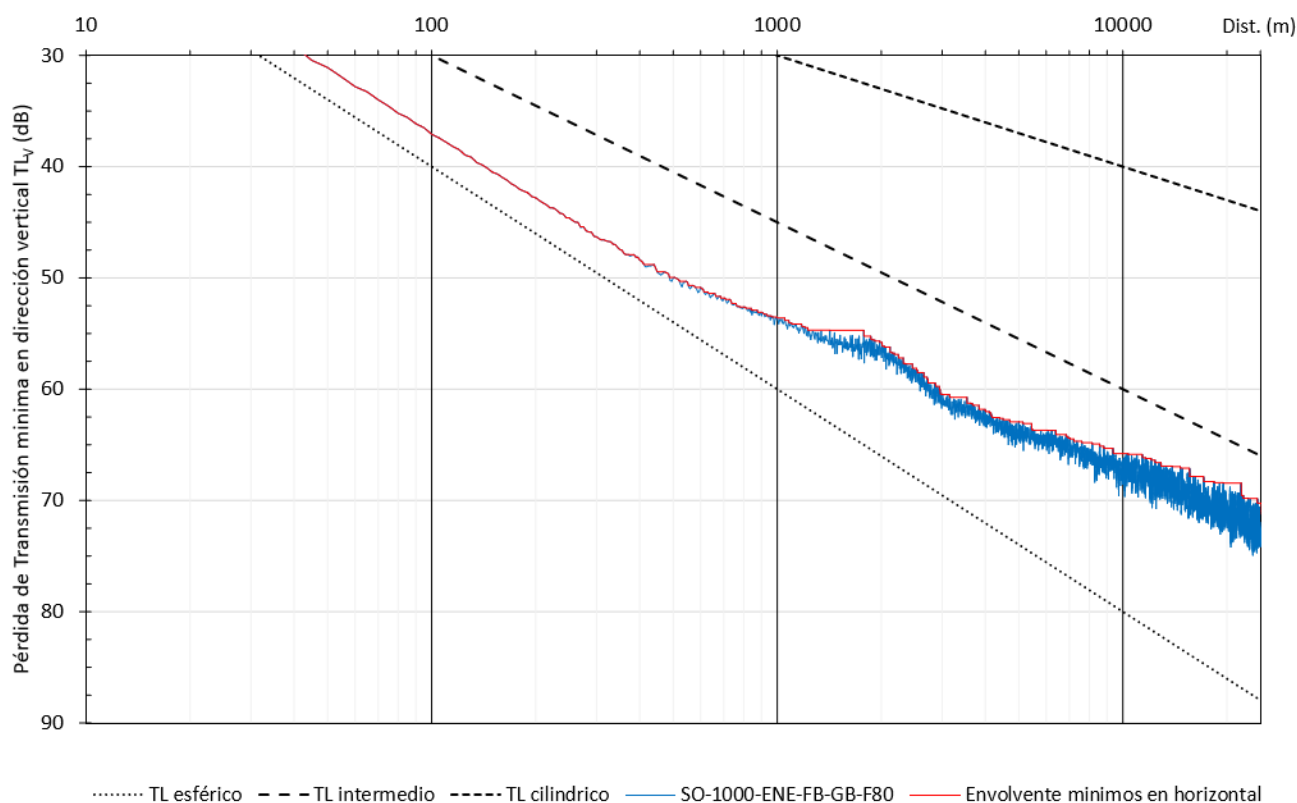


Figura 10. Ejemplo de procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical (línea azul oscilante) y la envolvente de mínimos en horizontal (línea roja)



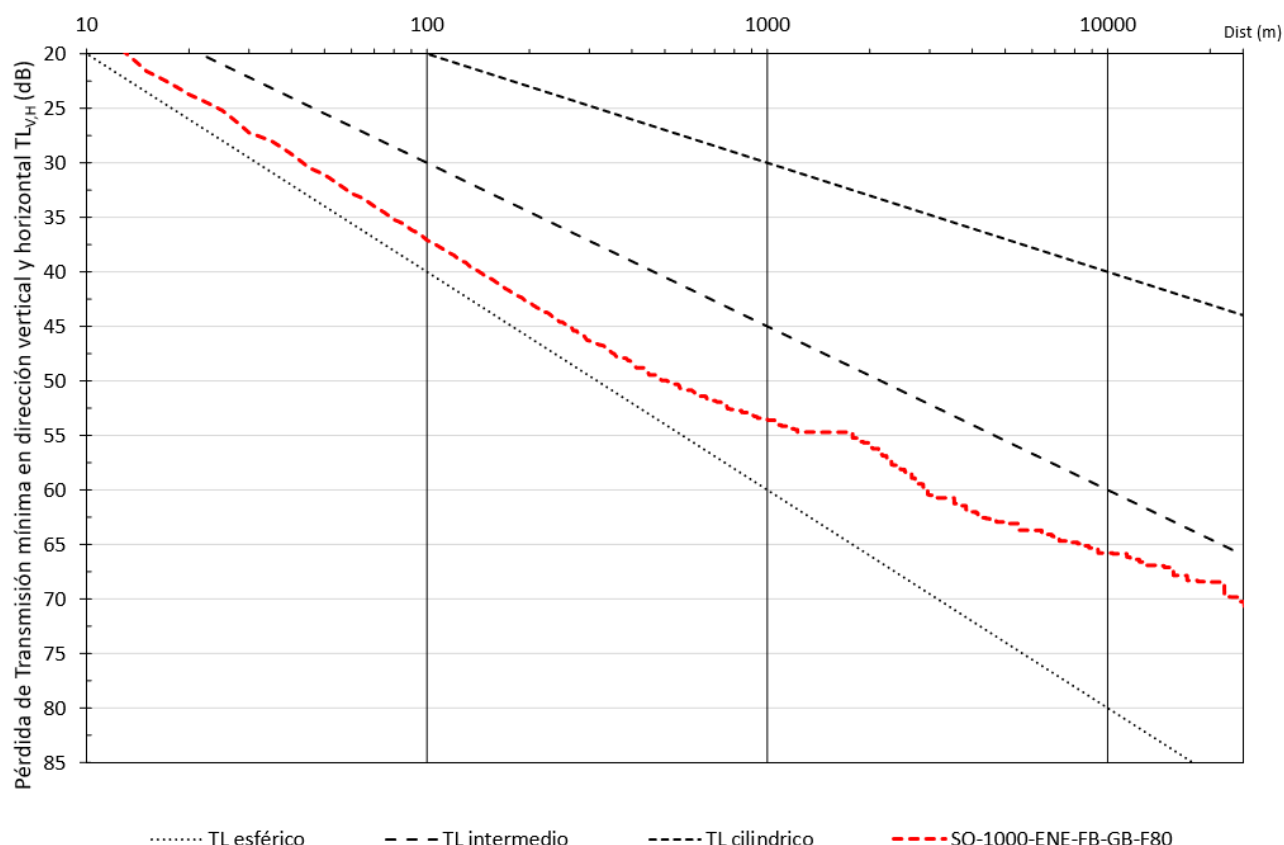


Figura 11. Ejemplo de resultado final del procesamiento de la matriz bidimensional de TL calculada por el modelo RAM para obtener la Pérdida de Transmisión mínima en vertical y en horizontal

Los procesos matemáticos empleados para el cálculo son los siguientes:

$TL_V(x) = \text{mínimo } TL(z,x) \text{ entre } z = 0 \text{ (superficie) y } z = P(x) \text{ profundidad en el punto de distancia "x"}.$

$TL_{V,H}(x) = \text{mínimo } TL_V(x) \text{ entre la distancia "x" y el límite de modelización (en este caso, 25.000 m).}$

La representación de $TL_{V,H}(x)$ resulta mucho más clara para realizar comparaciones y para definir distancias en los que se superen determinados valores de TL que los gráficos bidimensionales y las representaciones de $TL_V(x)$ que presentan oscilaciones.

Por lo tanto, en el presente Capítulo 6 y en los Anexos 2 y 3 de análisis de sensibilidad, todos los valores de TL que se ilustran en gráficos unidimensionales en función de la distancia como el mostrado en la Figura 11, que se mencionan como "Pérdida de Transmisión mínima" deben interpretarse como valores de $TL_{V,H}(x)$, obtenidos con los procedimientos presentados.

En cambio, en otros gráficos unidimensionales normalmente se denomina simplemente "Pérdida de Transmisión" al valor de $TL_V(x)$.



4.7 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los análisis de sensibilidad que se presentan en los Anexos 2 y 3, para 5 frecuencias representativas del espectro total (20, 40, 80, 160 y 320 Hz), permitieron alcanzar las siguientes conclusiones:

- En ambas zonas los puntos donde las Pérdidas por Transmisión son más conservativas son los de menor profundidad (1.000 metros) ubicados al Sudoeste en CAN_100-108 (SO-1000) y al Oeste en CAN_114 (O-1000).
- Estas condiciones han resultado más conservativas que las correspondientes a transectas de profundidad variable, salvo en algún caso particular de las frecuencias más altas ensayadas, que no son las más energéticas en la emisión, y a grandes distancias de la fuente.
- Si bien dentro del período en que se prevé que se realizarían las prospecciones (octubre a marzo) se seleccionaron los meses del año más conservativos para desarrollar los cálculos sistemáticos posteriores, correspondientes a Enero en CAN_100-108 y Octubre en CAN_114, las diferencias en los valores de TL para todas las frecuencias ensayadas que se obtienen en diferentes meses son prácticamente irrelevantes, por lo que se estima que las tareas podrían realizarse incluso en meses diferentes dentro de las estaciones de primavera y otoño sin que las conclusiones del estudio se vean modificadas.
- Los parámetros que se deben especificar para la modelización son ρ o ρ_b : densidad del sedimento, C_p : Velocidad compresional del sonido en el sedimento, C_s =Velocidad de corte, α_p (o A_p): atenuación asociada a la onda compresional, α_s (o A_s): atenuación asociada a la onda de corte.
- Con respecto a los parámetros del suelo, dadas las incertezas existentes no solo con respecto a su composición exacta sino a los valores que deben asumirse para un determinado tipo de suelo (en especial para el parámetro C_s , que para limos, arenas y gravas depende del espesor de la capa de sedimentos) se analizaron diversas variantes, y finalmente se seleccionó la denominada F1 (variante 1 de fangos en la capa superior, con menor espesor y valor de C_s) y G3 (variante 3 de gravas en la capa inferior, con mayor velocidad compresional C_p y mayor densidad).

Los parámetros finalmente adoptados para las modelizaciones sistemáticas desde 1 Hz a 1 kHz son los siguientes.

Tabla 4. Parámetros del modelo RAM empleados en ambas áreas

Parámetro	F1: menor espesor C_s según Hamilton	G3: mayor velocidad compresional y densidad
Espesor capa z (m)	10	30
C_p (m/s)	1500	1850
ρ (kg/m ³)	1500	2050
C_s (m/s)	163	499
C_s adoptado (m/s)	163	500
A_p (dB/ λ_p)	0,2	0,6
A_s (dB/ λ_s)	1,0	1,5

Cabe mencionar que el espesor de la capa de gravas subyacente se emplea para el cálculo de C_s , pero el programa RAM extiende el mismo hacia zonas más profundas en función de las condiciones de propagación de las ondas sonoras (mayor penetración a menor frecuencia).

5 RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA SISTEMÁTICA DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN

Una vez seleccionadas las condiciones y parámetros de cálculo de la Pérdida de Transmisión en base a los análisis de sensibilidad efectuados, el proceso de modelación se realizó en forma sistemática para todas las frecuencias en tercios de octavas entre 1 Hz y 1 kHz según la definición brindada en la fórmula [7] del parágrafo 2.9.2.2 “Características de la emisión por parte de arreglos de prospección sísmica” del Capítulo 4, y los valores espectrales presentados en el parágrafo 2.9.3 “Emisión sonora submarina por las fuentes de energía de aire comprimido” del mismo Capítulo.

Los resultados obtenidos de $TL_{V,H}(x)$ y $TL_V(x)$ se presentan a continuación para las condiciones seleccionadas en cada área (Figura 12 y Figura 13 para CAN_100-108; Figura 14 y Figura 15 para CAN_114).

En el caso de la pérdida de transmisión mínima se grafican los resultados correspondientes a distancias superiores a 10 metros, dado que para frecuencias bajas los valores que calcula el modelo RAM no resultaron confiables para distancias menores (cuestión que de todas formas es irrelevante para el presente análisis). En particular, los resultados para una frecuencia de 1 Hz presentan un comportamiento irregular, lo cual no tiene importancia puesto que es una frecuencia que no aporta prácticamente energía tanto desde el punto del SPL como del SELcum.

Se puede apreciar que hasta 1 km de distancia los valores de TL se mantienen en el rango entre la dispersión geométrica esférica y la intermedia, siendo esto coherente con el hecho de que la profundidad de agua es de 1.000 metros. A distancias mayores y para un grupo de frecuencias TL comienza a ser inferior al correspondiente a la dispersión intermedia, sin llegar a asemejarse a una dispersión geométrica cilíndrica.

Dado que del análisis de sensibilidad surgió que en algunos casos para frecuencias altas y distancias grandes la combinación de Arena sobre Grava era más conservativa que la de Fango sobre Grava, a los fines de verificación se realizó la modelización para las frecuencias en tercios de octavas también para el caso del punto SO-1000 (CAN_100-108) con los perfiles oceanográficos del mes de Enero y la combinación AB-GB (parámetros base), presentándose los resultados en la Figura 16 y la Figura 17. Puede apreciarse que los mismos son similares a los correspondientes a Fangos sobre Gravas.



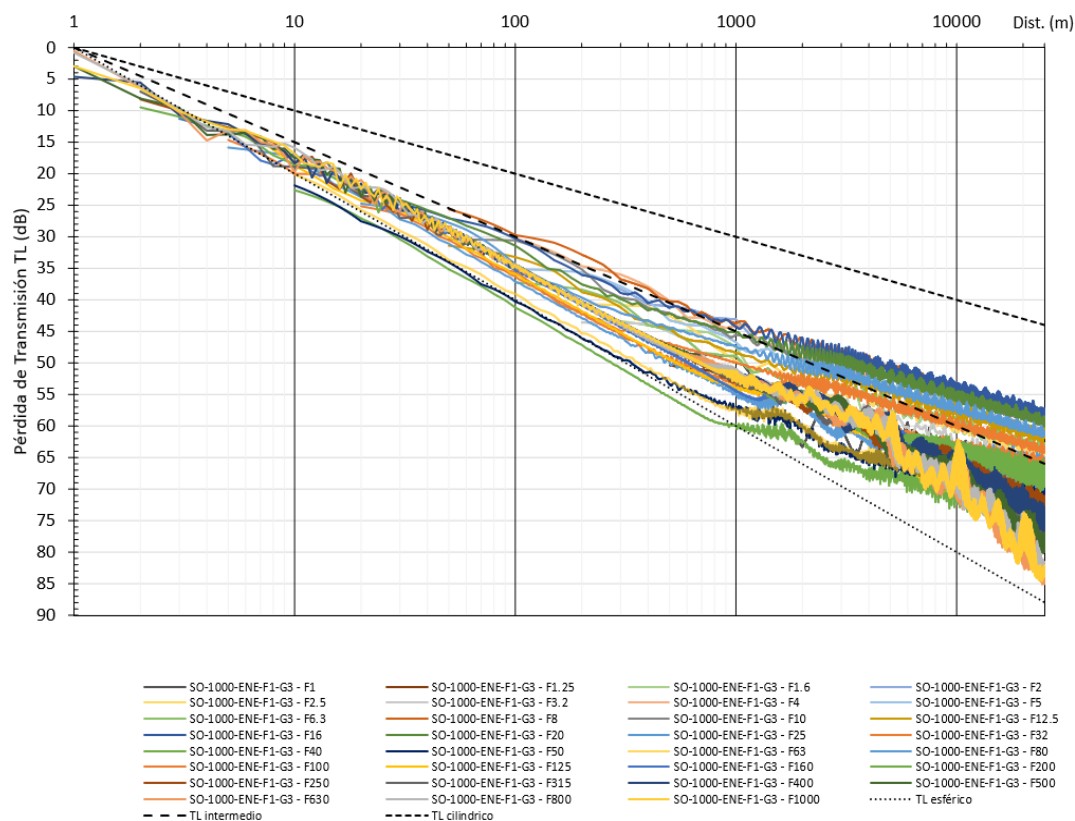


Figura 12. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para el área CAN_100-108, con la condición más conservativa del análisis de sensibilidad (Fangos F1 y Gravas subyacentes G3)

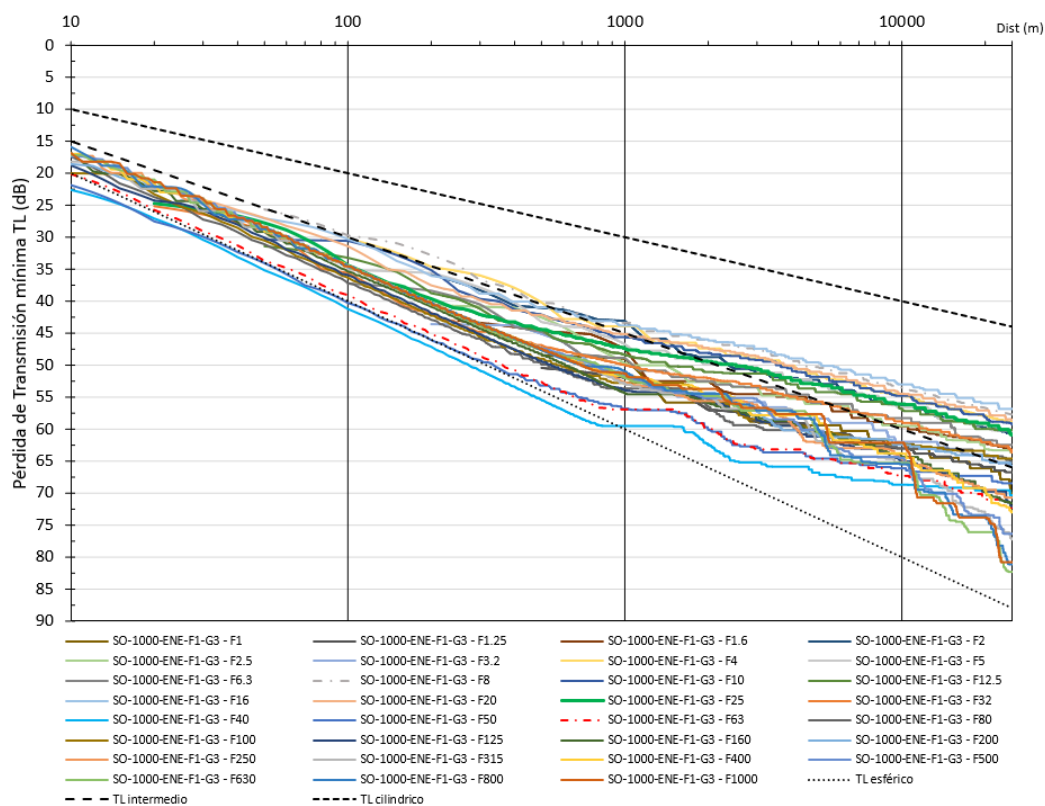


Figura 13. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical y en distancia TL_{v,h} para el área CAN_100-108, con la condición más conservativa del análisis de sensibilidad (Fangos F1 y Gravas subyacentes G3)

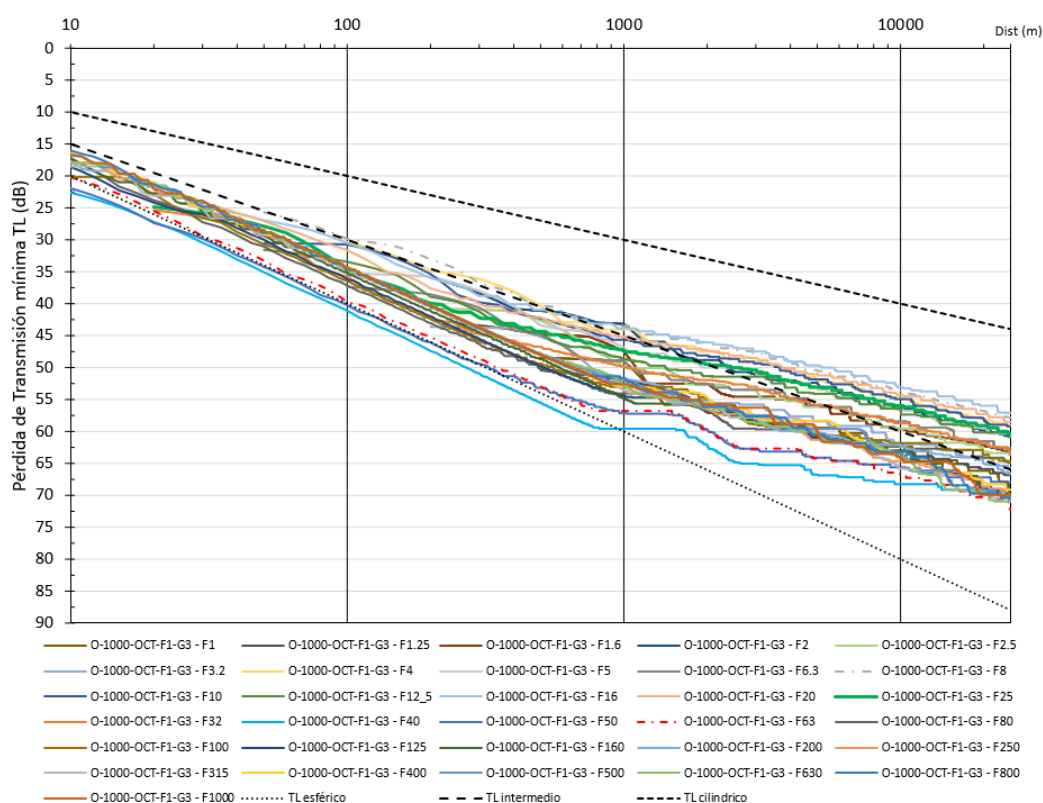
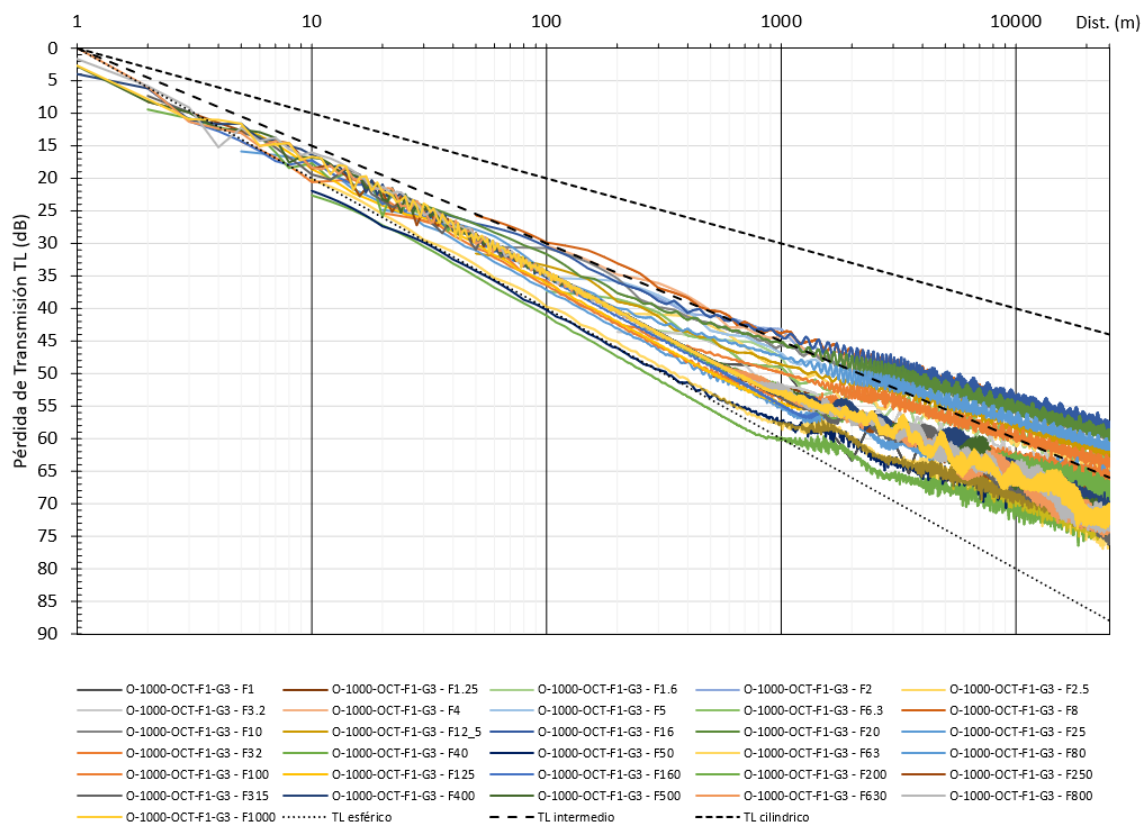


Figura 15. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical y en distancia $TL_{v,h}$ para el área CAN_114, con la condición más conservativa del análisis de sensibilidad (Fangos F1 y Gravas subyacentes G3)

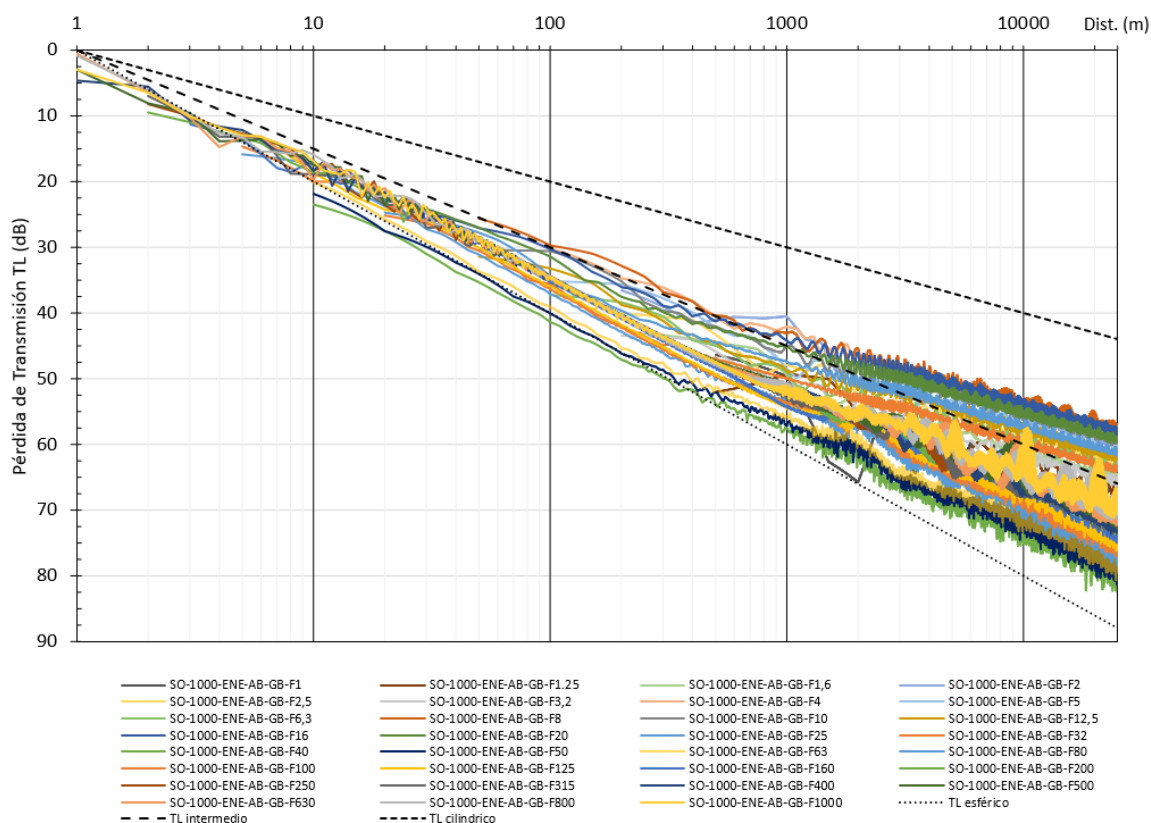


Figura 16. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical TL_v para el área CAN_100-108, con la condición de suelo superficial Arenas (AB) y Gravas subyacentes (GB)

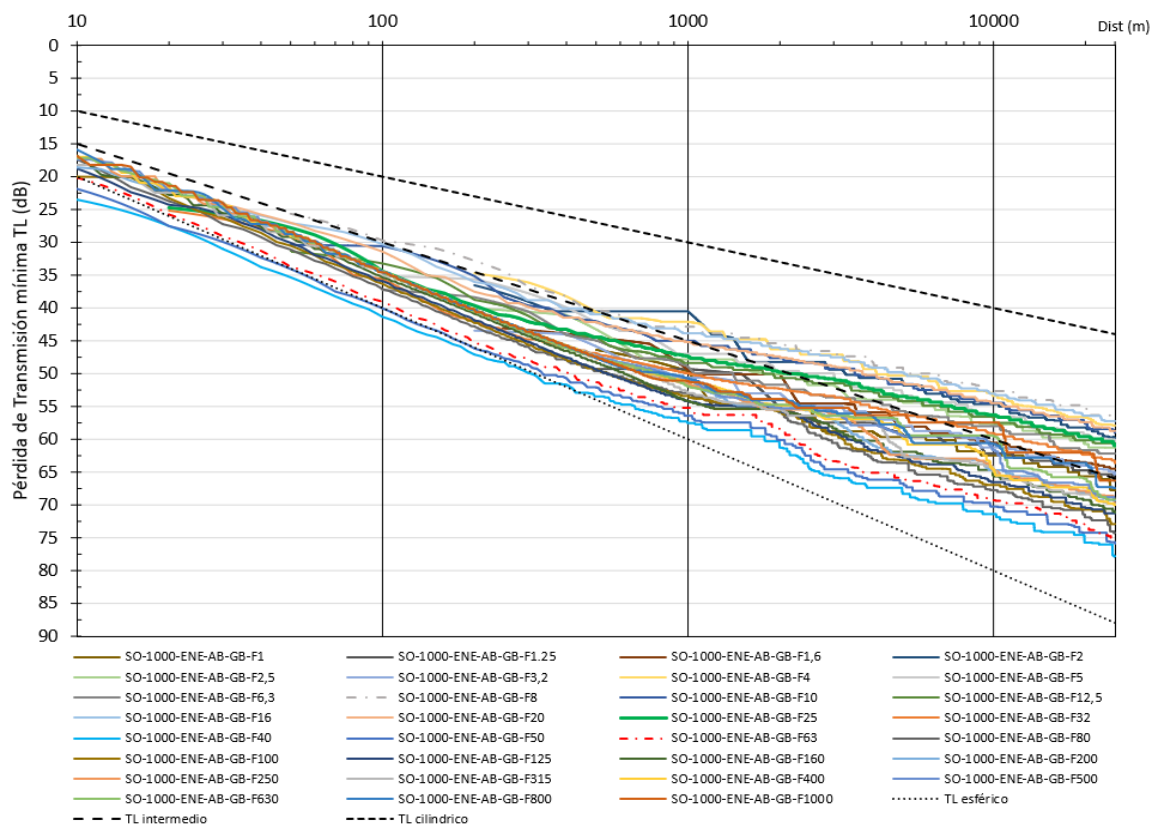


Figura 17. Pérdida de Transmisión mínima en la vertical y en distancia TL_{v,h} para el área CAN_100-108, con la condición de suelo superficial Arenas (AB) y Gravas subyacentes (GB)

6 RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL SEL

Como se indicó en el Capítulo 4, los niveles sonoros emitidos verticalmente son como mínimo entre 15 y 24 dB mayores que aquellos dirigidos horizontalmente (Caldwell y otros, 2000). La propagación del sonido a grandes distancias requiere la modelización de la emisión horizontal, que presenta en su conjunto menor energía que la vertical.

En el presente estudio, en vez de adoptar una diferencia constante entre la emisión horizontal y vertical seleccionada en el rango indicado previamente, se realiza la modelización de todo el rango de tercios de octavas seleccionando el espectro correspondiente a un dado ángulo respecto de la vertical (Dip) para un ángulo respecto a la dirección de avance (Azimut).

Teniendo en cuenta las grandes profundidades características de esta zona, se consideró apropiado adoptar para este caso particular un ángulo vertical Dip = 70° (20° respecto a la horizontal), el cual presenta una diferencia en la emisión total de energía con respecto a la vertical inferior a la antes citada de acuerdo a la bibliografía.

En efecto, la Tabla 7 “SEL (dB re 1 μPa^2 s a 1 m) total emitido para diferentes ángulos respecto a la vertical y Azimut respecto a la dirección de avance” del Capítulo 4, muestra que en la dirección de avance (Azimut 0°), el SEL para Dip 70° es aproximadamente menor que para Dip 0° (vertical) en 11 dB. Pero, además, se puede apreciar que para la emisión en dirección perpendicular al avance (Azimut 90°), la diferencia entre el SEL para Dip 70° y 0° se reduce a sólo 6 dB, siendo esta situación mucho más conservativa que los criterios considerados en la bibliografía aplicable.

En consecuencia, se analizó la propagación del SEL para todo el espectro de tercios de octavas comparando las siguientes tres condiciones:

- Emisión vertical (Dip 0°) a modo de referencia.
- Azimut 0° y Dip 70°
- Azimut 90° y Dip 70°

Asimismo, se evaluó el efecto de filtrado con el audiograma de cada grupo auditivo, información necesaria para el posterior cálculo del SEL acumulado.

El procedimiento se realizó para cada una de las 30 bandas consideradas entre 1,3 Hz a 1 kHz.

A partir del Source Level $SL_B(j)$ para cada banda “j” y restando la Pérdida de Transmisión Mínima $TL_{V,H}(R,j)$ para cada distancia “R” de la fuente y banda, se calculó el nivel de SEL recibido $RL_B(R,j)$ en cada distancia y banda empleando la ecuación [5].

Los valores obtenidos de SEL recibido $RL_B(R,j)$ para cada banda, sin filtro y para cada filtro auditivo se presentan como ejemplo para el caso de Azimut 0° y Dip 70°, en la **Figura 18** a la **Figura 23**.

Los gráficos permiten visualizar en primer lugar que las frecuencias más bajas, de hasta 3,2 Hz, aportan bajos valores de SEL aún sin filtrar, y como los audiofiltros modifican el SEL recibido para cada banda de manera diferente, reduciendo fuertemente o anulando prácticamente el SEL de frecuencias menores a unos 5 Hz. Se destacó en punteado una frecuencia característica de la parte de mayor emisión del espectro (80 Hz) solo a los efectos de permitir una visualización y comparación de su grado de reducción al aplicar los diferentes filtros.



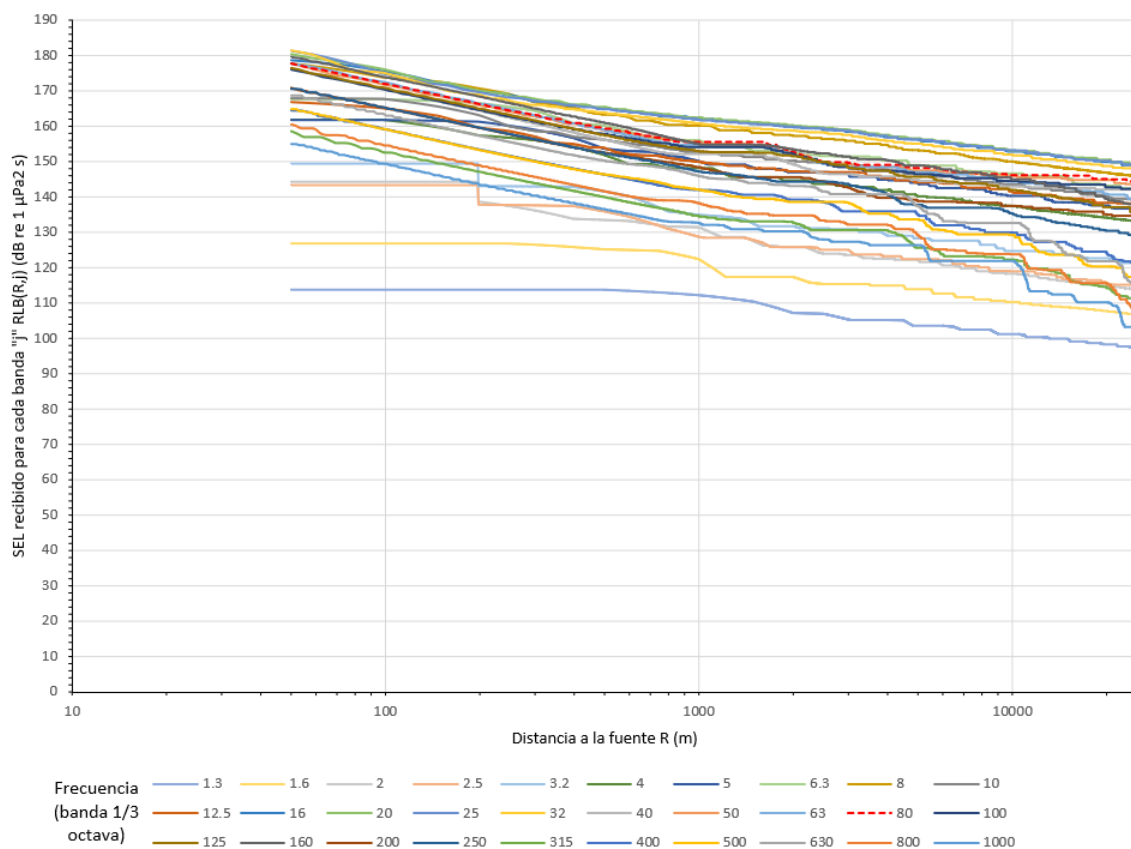


Figura 18. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Sin Filtro

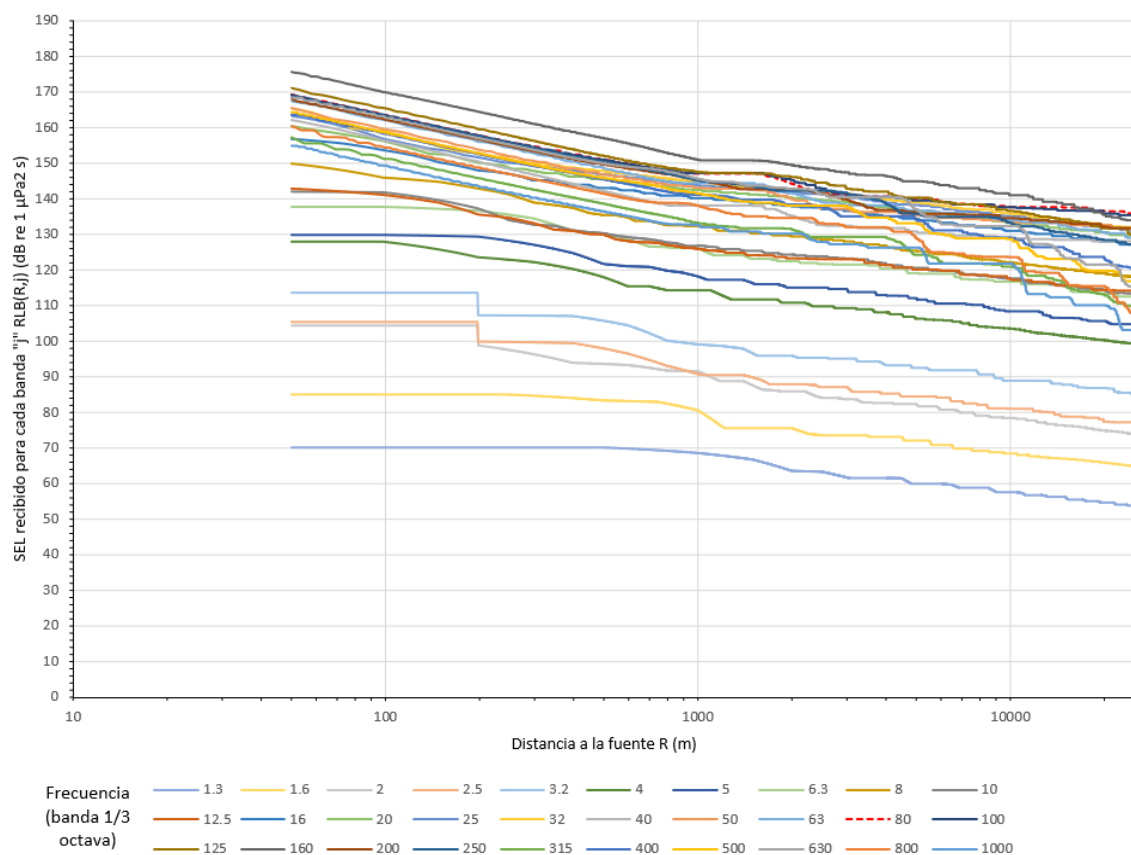


Figura 19. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Filtro LF

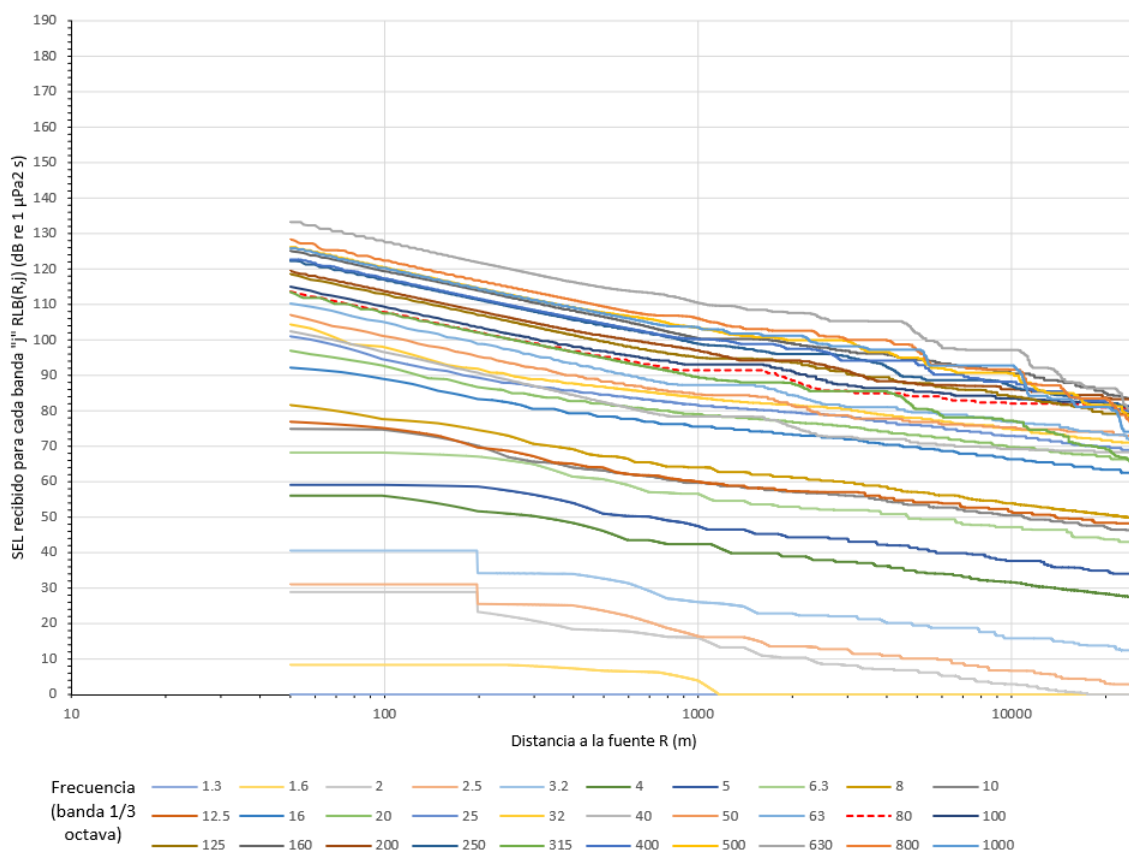


Figura 20. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Filtro HF

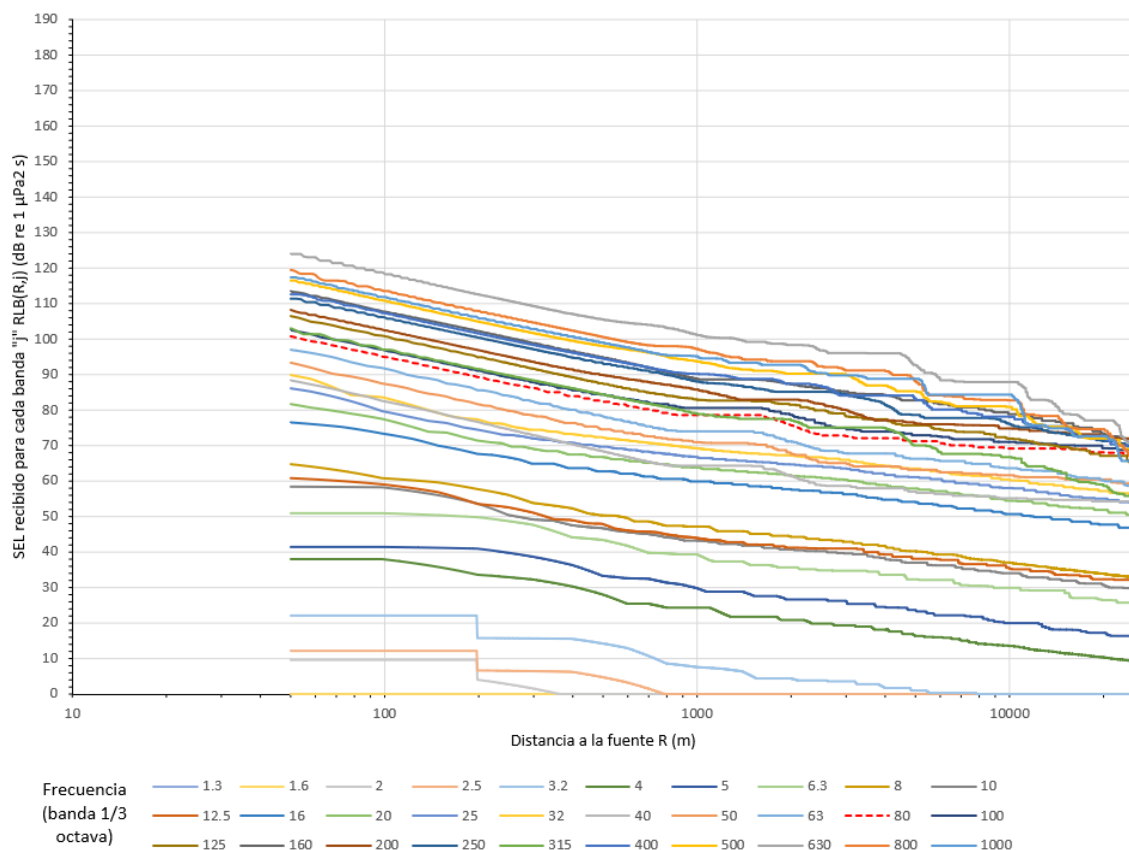


Figura 21. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Filtro VHF

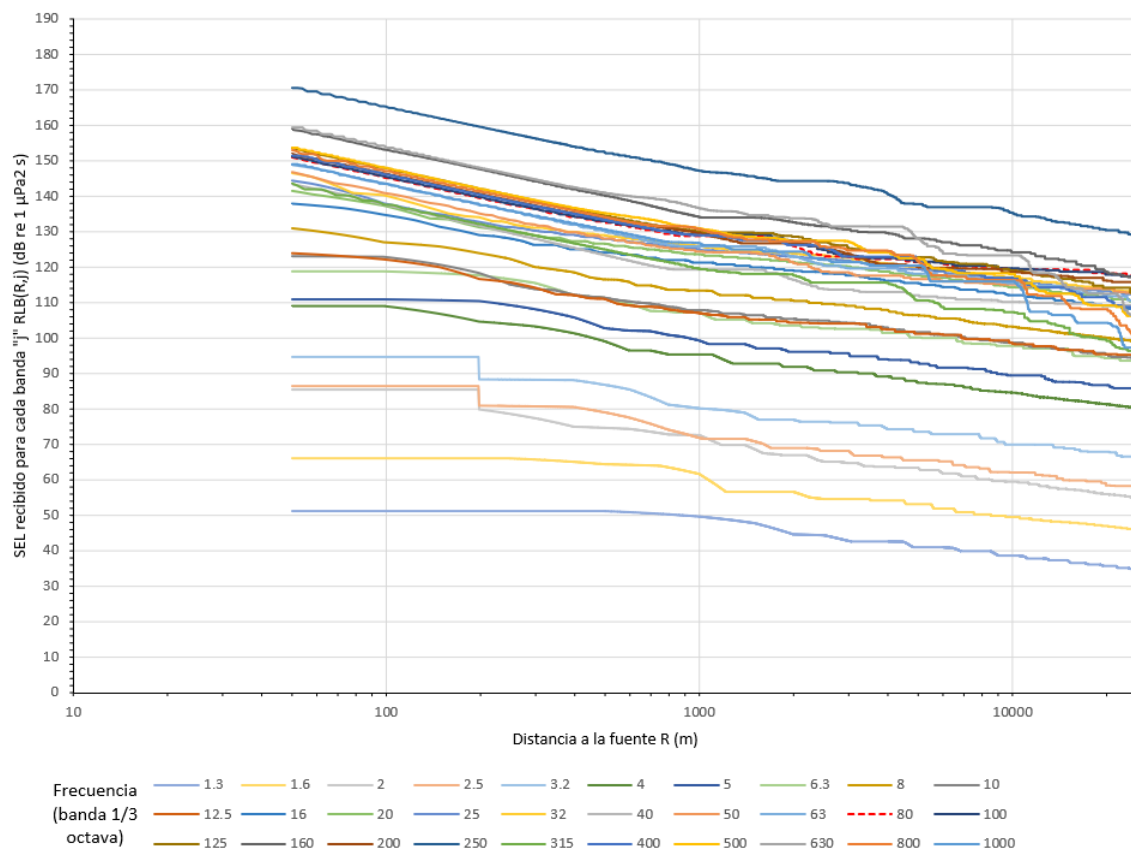


Figura 22. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Filtro PW

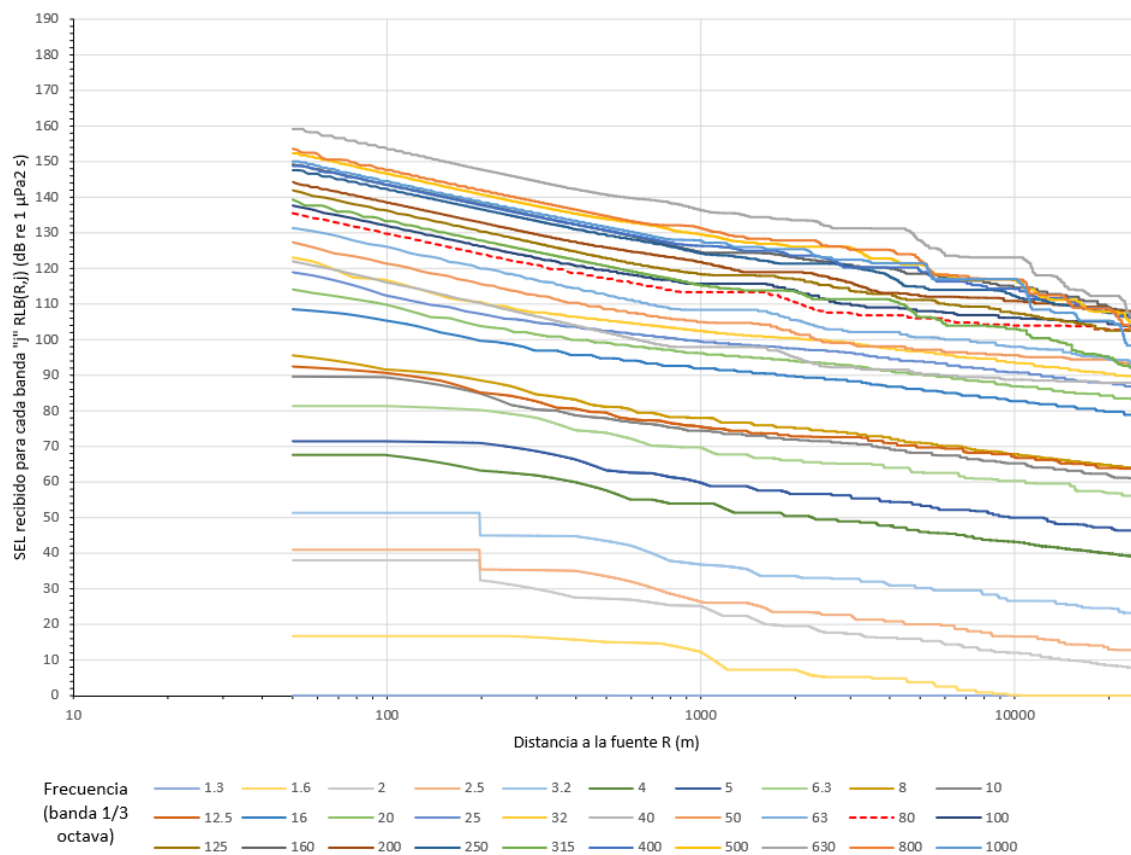


Figura 23. SEL recibido (RL) para cada banda. CAN_100-108. Azimut 0° Dip 70°. Filtro PO

Al observar los gráficos precedentes, cabe recordar que los “escalones” y tramos con SEL constante que se visualizan para algunas frecuencias (especialmente las más bajas), se deben a que una oscilación en un punto “d” que disminuya el valor de $TL_{V,H}(d)$ en relación con los valores para distancias menores ($x < d$), implica que el valor de $TL_V(d)$ (mínimo) será igual a $TL_{V,H}(d)$ en un cierto tramo con $x < d$ (hasta que se produzca la siguiente oscilación con menor valor de $TL_{V,H}$), con lo cual el valor del SEL calculado se mantiene estable sin modificaciones en el mismo tramo (criterio conservativo).

Las contribuciones al SEL por parte de cada banda se suman en el dominio lineal y se vuelven a representar en el dominio logarítmico en decibeles, mediante la siguiente ecuación:

$$RL(SEL_{TOTAL}) = \log_{10} \left[\sum_{j=1}^N 10^{\frac{RL_B(j)}{10}} \right] \quad [7]$$

Donde:

N = número de bandas de 1/3 de octava (30 en este caso)

Los resultados de $RL(SEL_{TOTAL})$ se presentan en las siguientes figuras, que incluyen el SEL total recibido para Dip 0° (el cual es independiente del Azimut) y con Dip 70° para Azimut 0° o para Azimut 90°, junto con la diferencia con el valor para Dip 0°.

Esta diferencia es la que en realidad influye en la acumulación del SEL para cada distancia cuando se adopta un ángulo de emisión diferente del vertical, y según se puede apreciar en la Tabla 5 y la Tabla 6 en el área CAN_100-108, para Azimut 0° es algo mayor cuando se filtra el SEL con los audiogramas (pasando de unos 10 dB sin filtro a 13 dB para LF y PW), mientras que para Azimut 90 se reduce prácticamente a la mitad del valor sin filtro, pasando de 7,6 dB a unos 3,5 dB.

Los resultados para el área CAN_114 que se presentan en la Tabla 7 y la Tabla 8 son similares.

De la Figura 24 a la Figura 35 se presentan los resultados para CAN_100-108, y de la Figura 36 a la Figura 47 se presentan para CAN_114.

En el título de cada figura se indica el punto correspondiente, el mes y el tipo de suelo (Fango F1 sobre Grava G3) que fueron seleccionados como la condición globalmente más conservativa.

Tabla 5. CAN_100-108. Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 1.000 m para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 70°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	9,9	12,0	10,1	9,5	11,8	10,0
Media	10,3	13,0	12,5	11,9	13,2	12,4
Máxima	11,0	13,8	15,1	14,8	14,4	15,2
Desvío Estándar	0,2	0,4	1,5	1,5	0,7	1,5

Tabla 6. CAN_100-108. Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 1.000 m para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 70°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	5,3	2,3	2,9	3,0	2,6	2,9
Media	7,6	3,5	3,3	3,5	3,2	3,4
Máxima	8,3	4,5	4,3	4,7	3,8	4,6
Desvío Estándar	0,5	0,6	0,3	0,4	0,3	0,4

Tabla 7. CAN_114. Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 1.000 m para Azimut 0° entre Dip 0° y Dip 70°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	9,9	12,0	10,3	9,7	11,8	10,2
Media	10,3	12,8	11,3	10,6	12,7	11,1
Máxima	11,0	13,4	12,2	11,4	13,5	12,0
Desvío Estándar	0,2	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5

Tabla 8. CAN_114. Diferencias SEL Transmitido (dB) entre 50 m y 1.000 m para Azimut 90° entre Dip 0° y Dip 70°

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Mínima	5,3	2,2	3,2	3,5	2,6	3,4
Media	7,5	3,4	3,5	3,8	3,2	3,7
Máxima	8,3	4,5	4,0	4,3	4,0	4,2
Desvío Estándar	0,4	0,6	0,2	0,2	0,4	0,2

El mismo proceso se realizó a modo de verificación para la combinación de tipo de suelo Arena superior (AB) sobre Grava (GB) en CAN_100-108, como se indicó previamente. Dado que los resultados son similares tanto en cuanto a las tablas previas de diferencias de SEL como a los diferentes gráficos, se presentan únicamente los valores de SEL recibidos sin filtro, en la Figura 48 y la Figura 49.



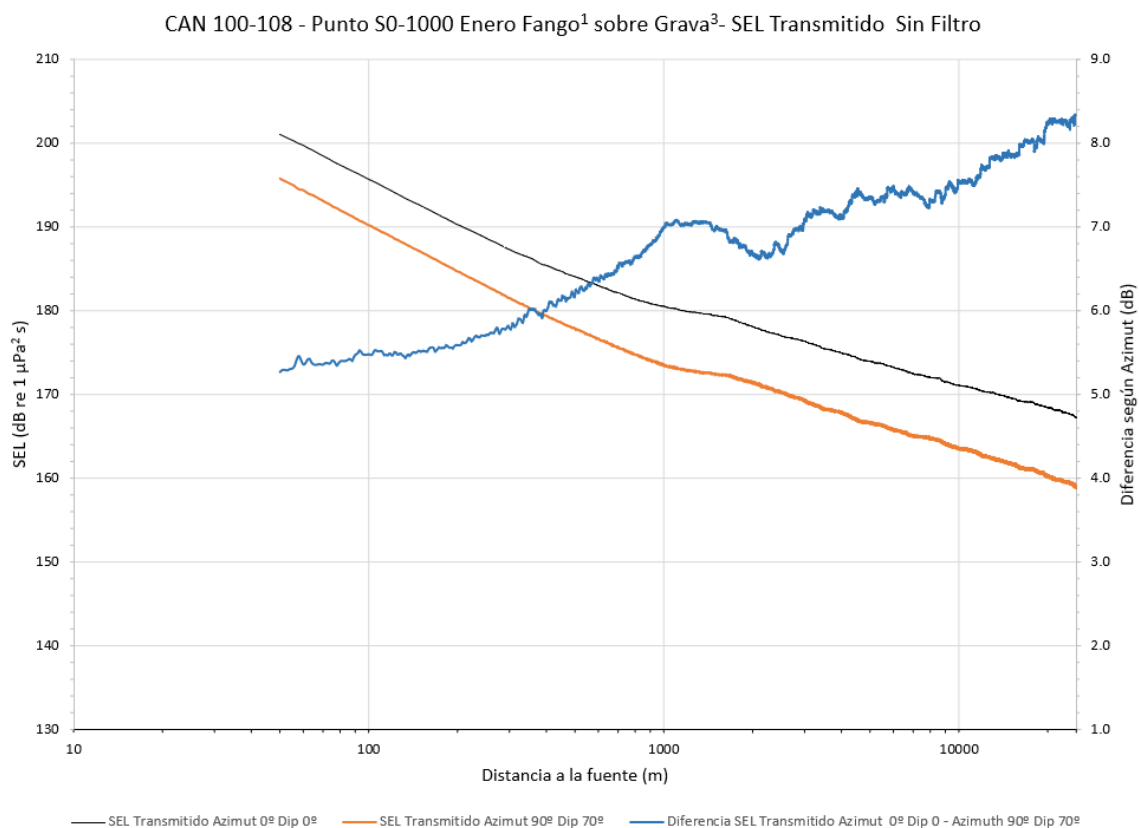


Figura 24. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Sin Filtro

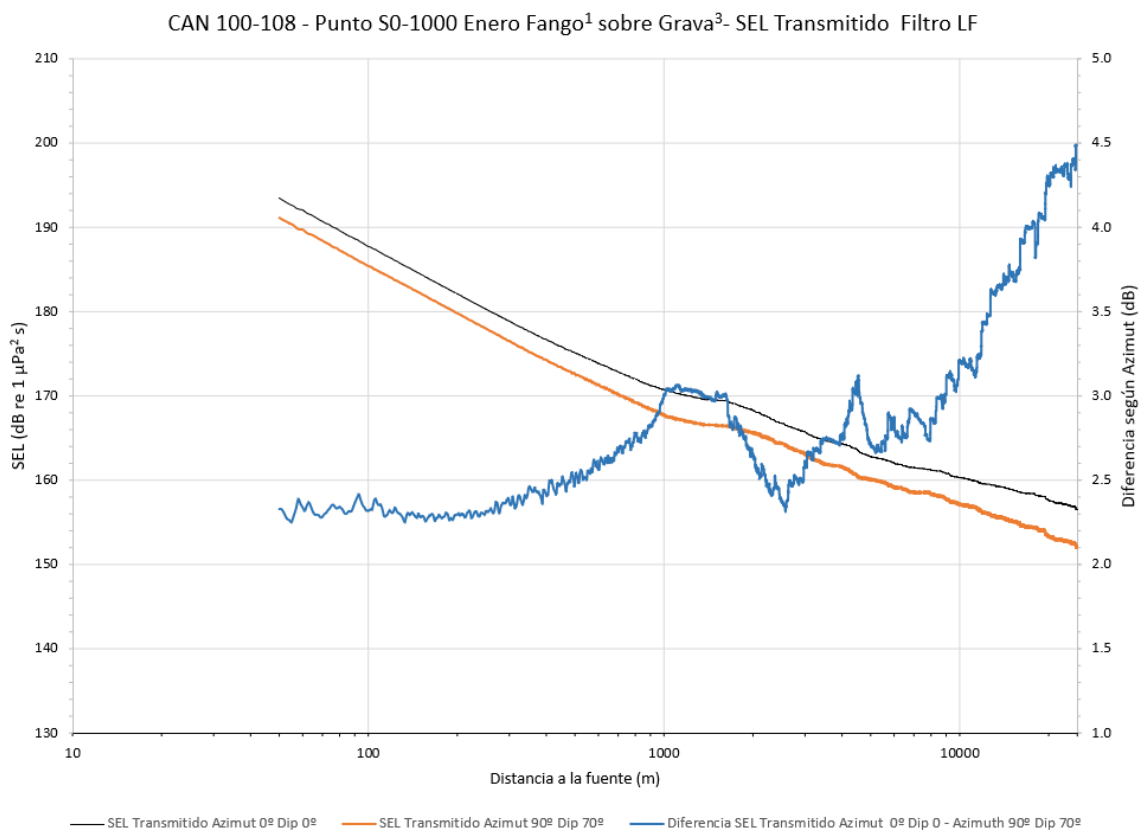


Figura 25. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Filtro LF (baja frecuencia)

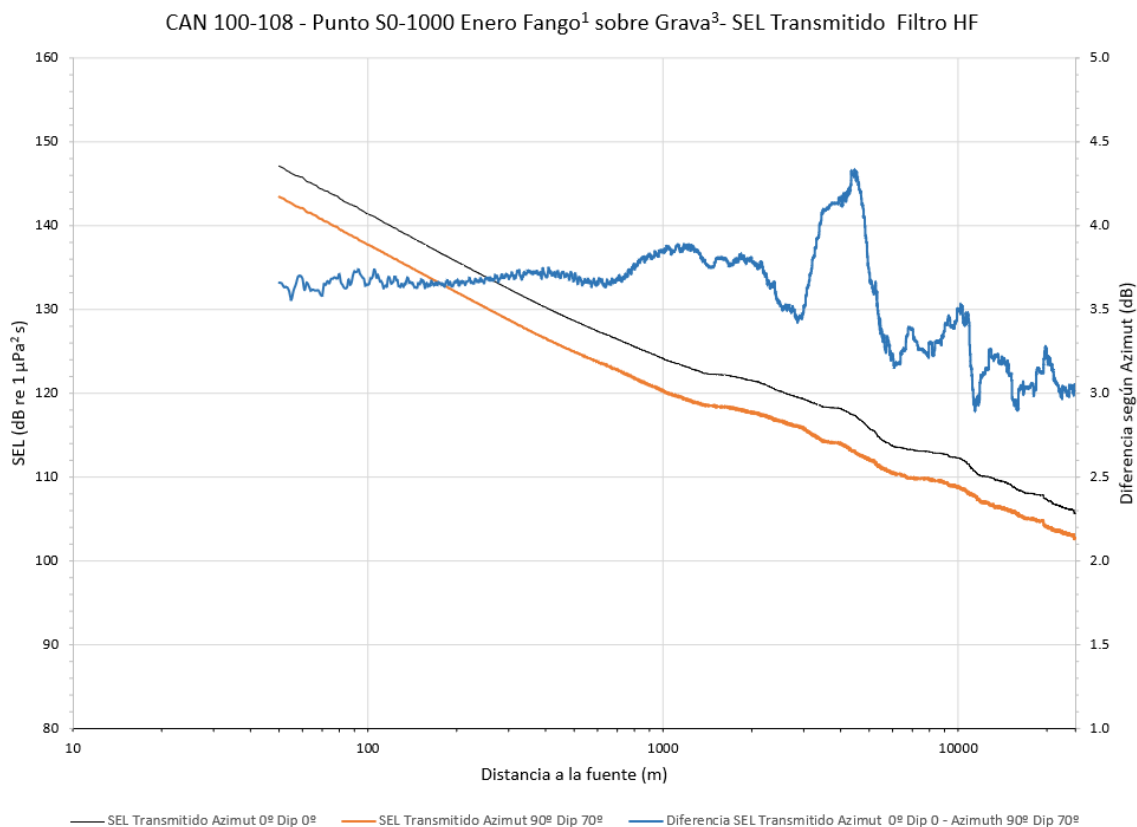


Figura 26. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Filtro HF (alta frecuencia)

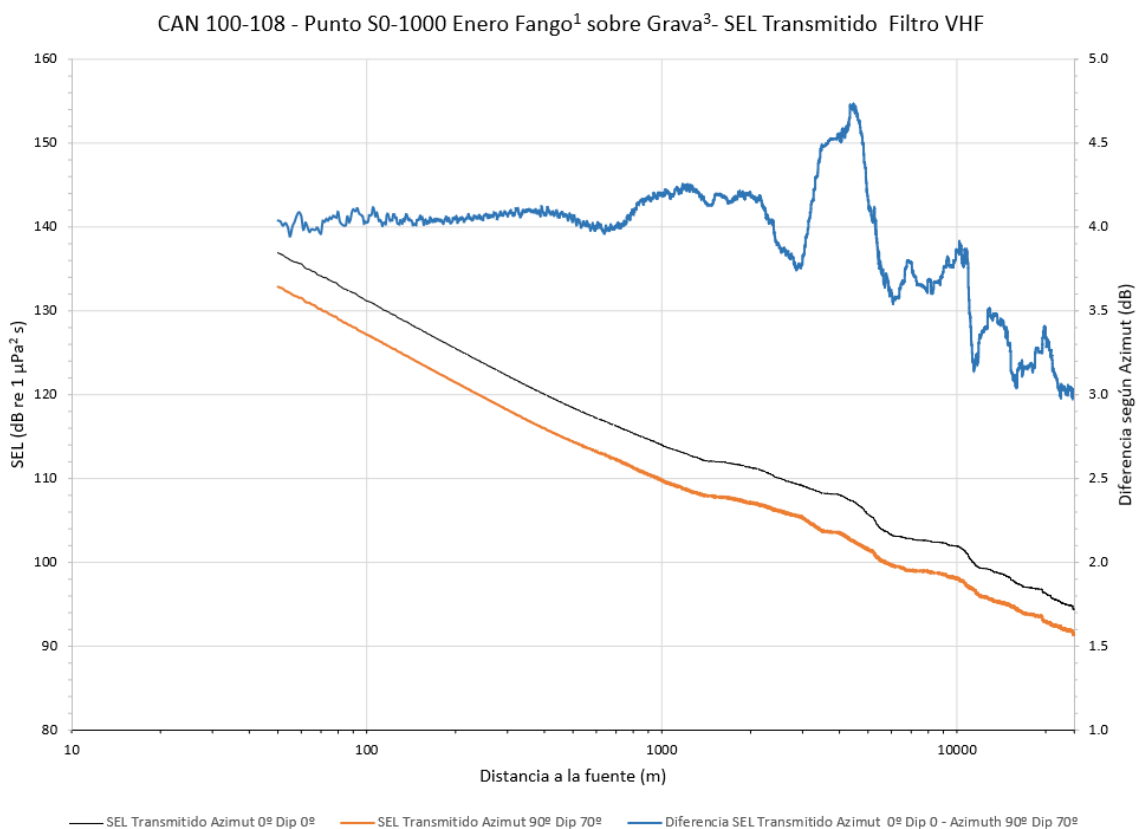


Figura 27. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Filtro VHF (muy alta frecuencia)

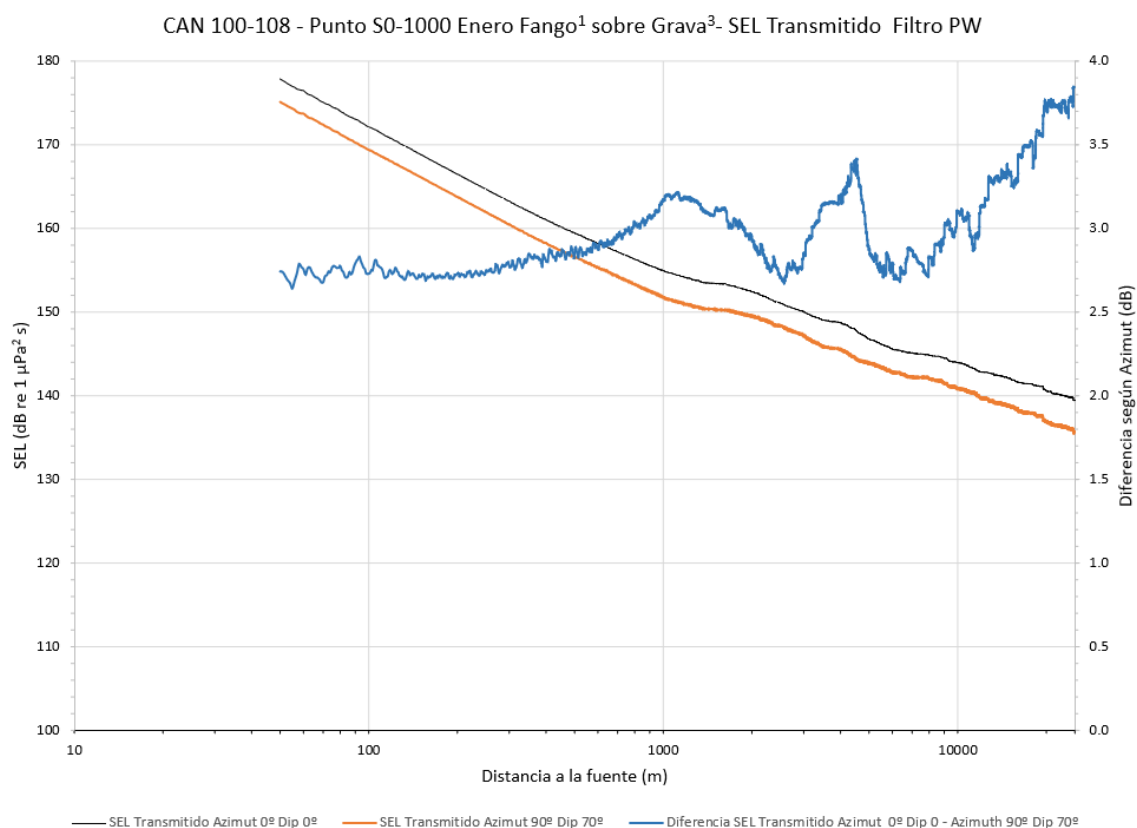


Figura 28. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Filtro PW (Carnívoros Fócidos)

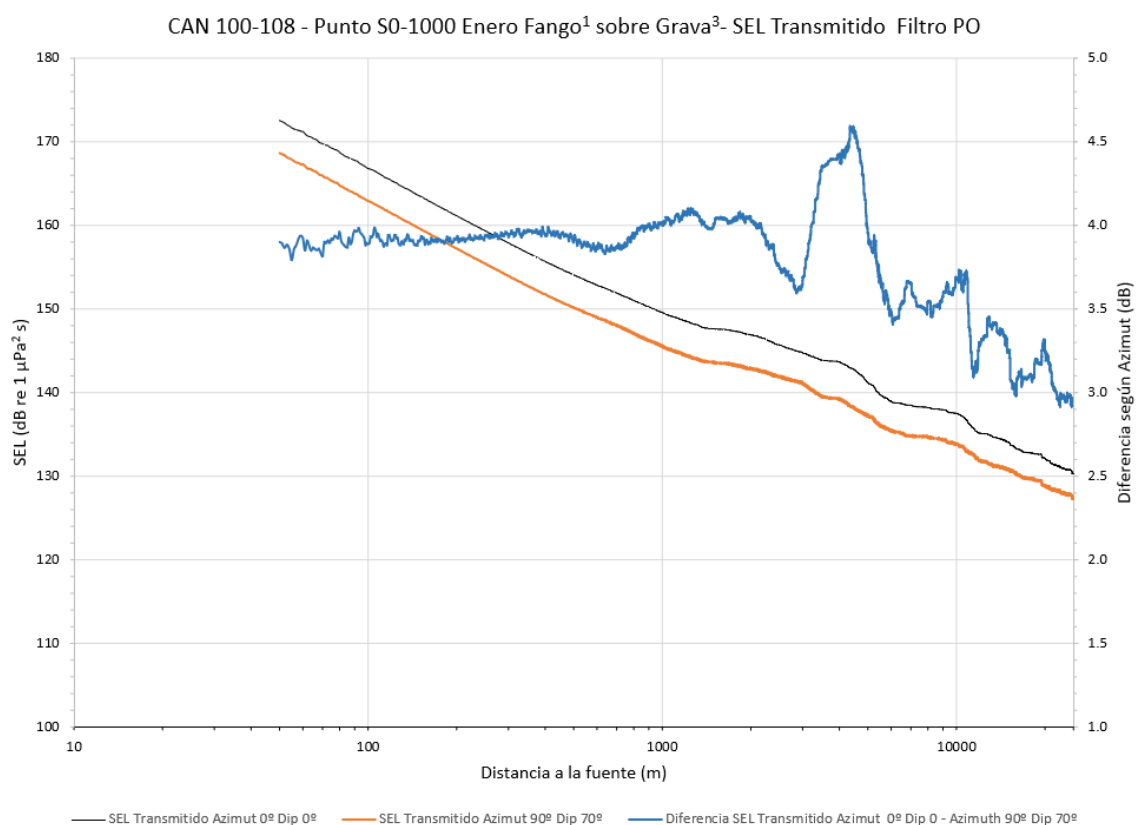


Figura 29. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Filtro PO (Pinnípedos Otáridos)

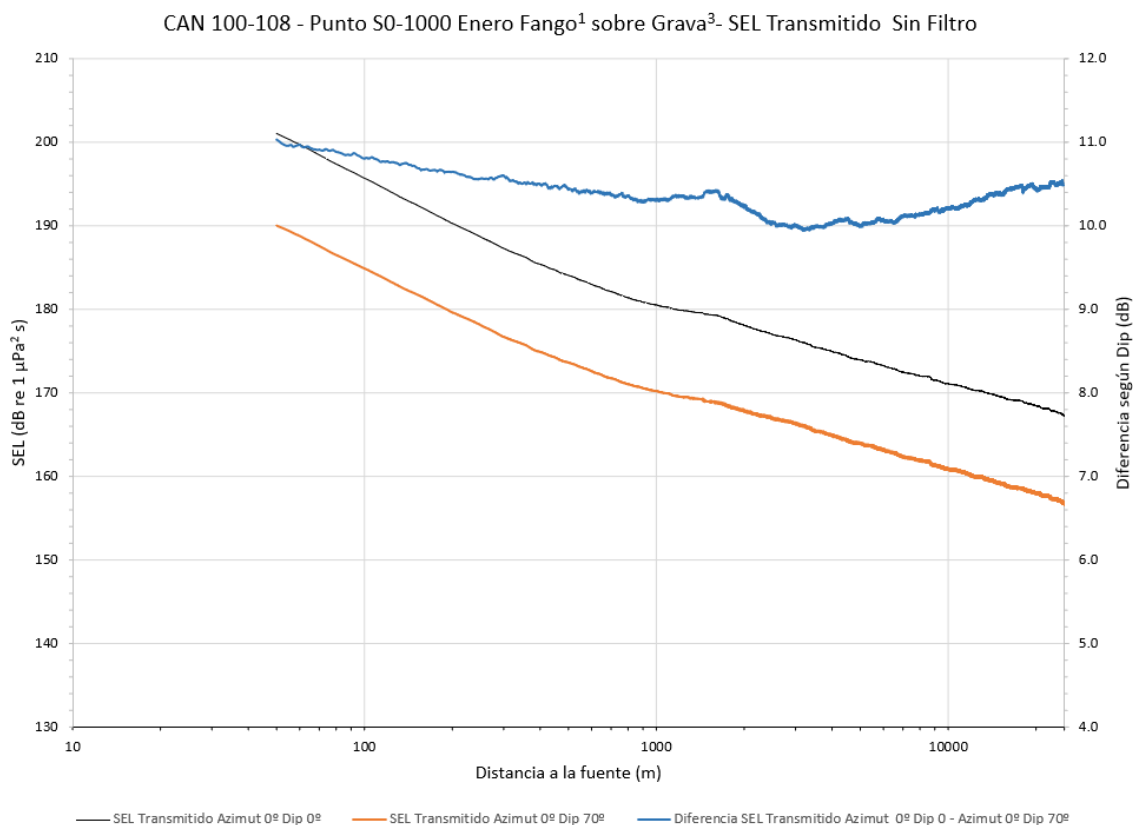


Figura 30. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° Dip 0°-70° Sin Filtro

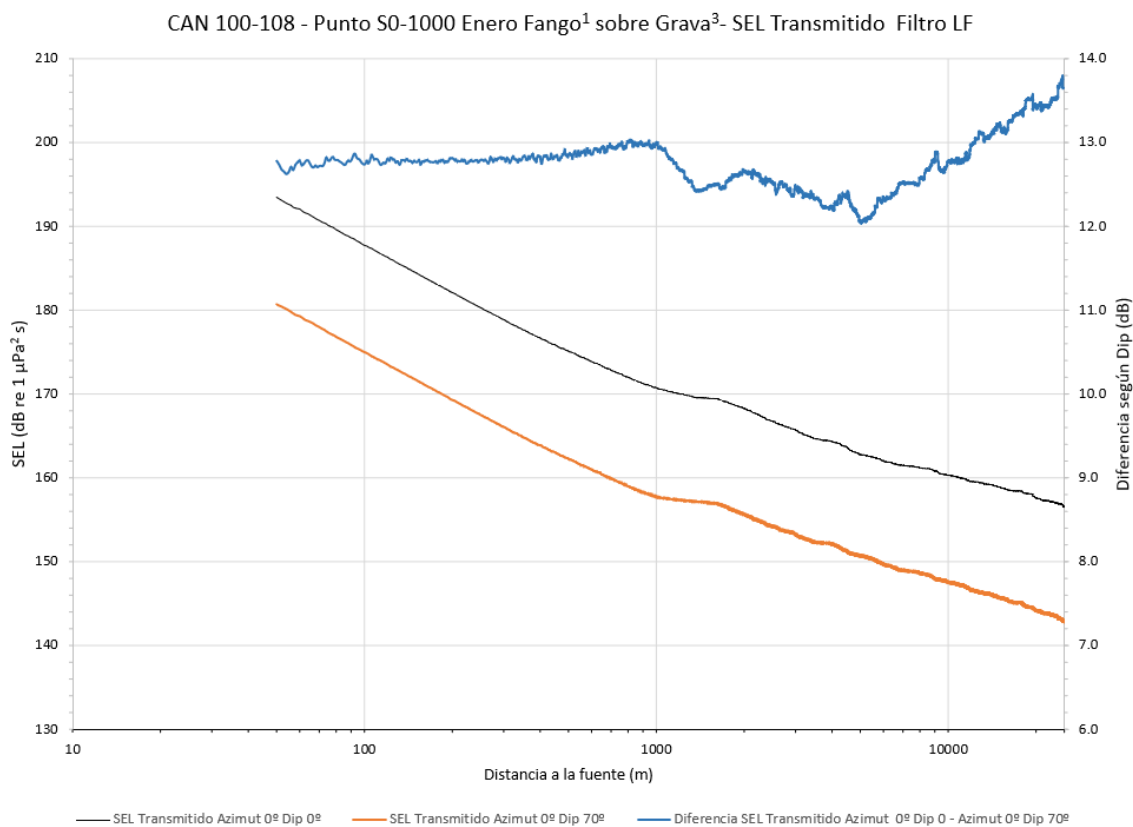


Figura 31. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro LF (baja frecuencia)



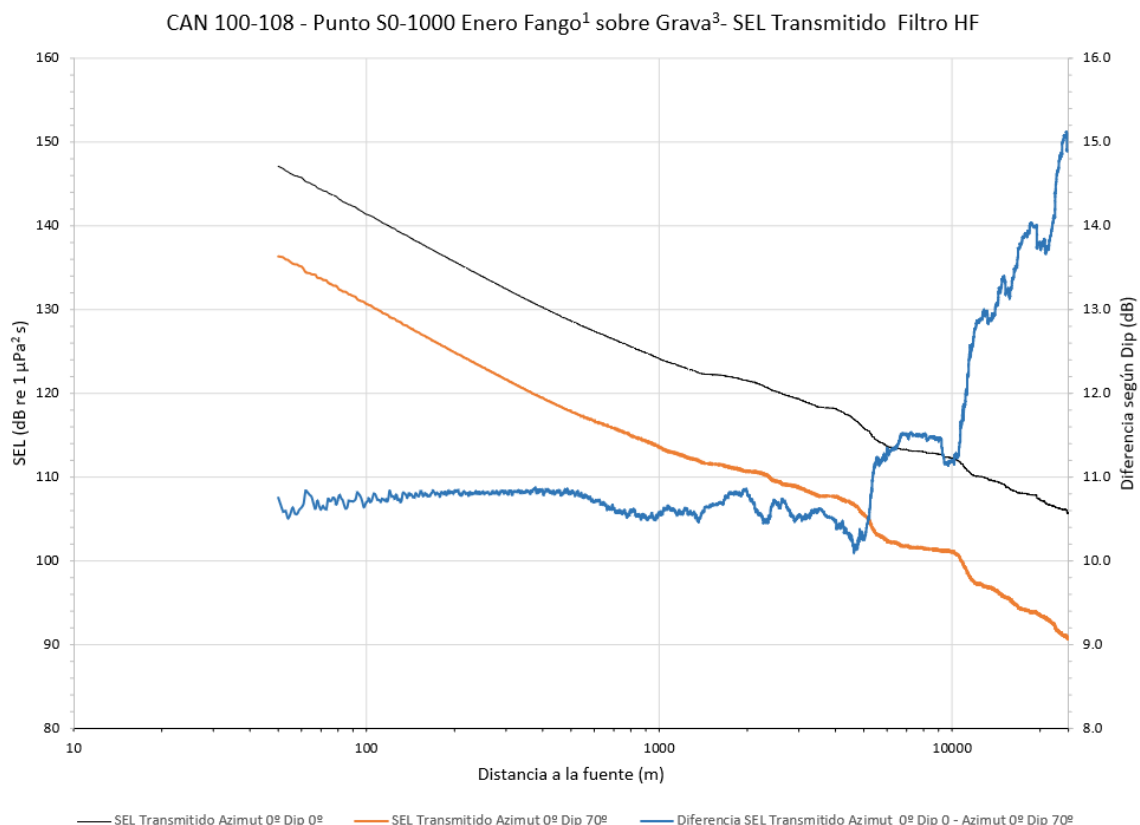


Figura 32. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0º Dip 0º-70º Filtro HF (alta frecuencia)

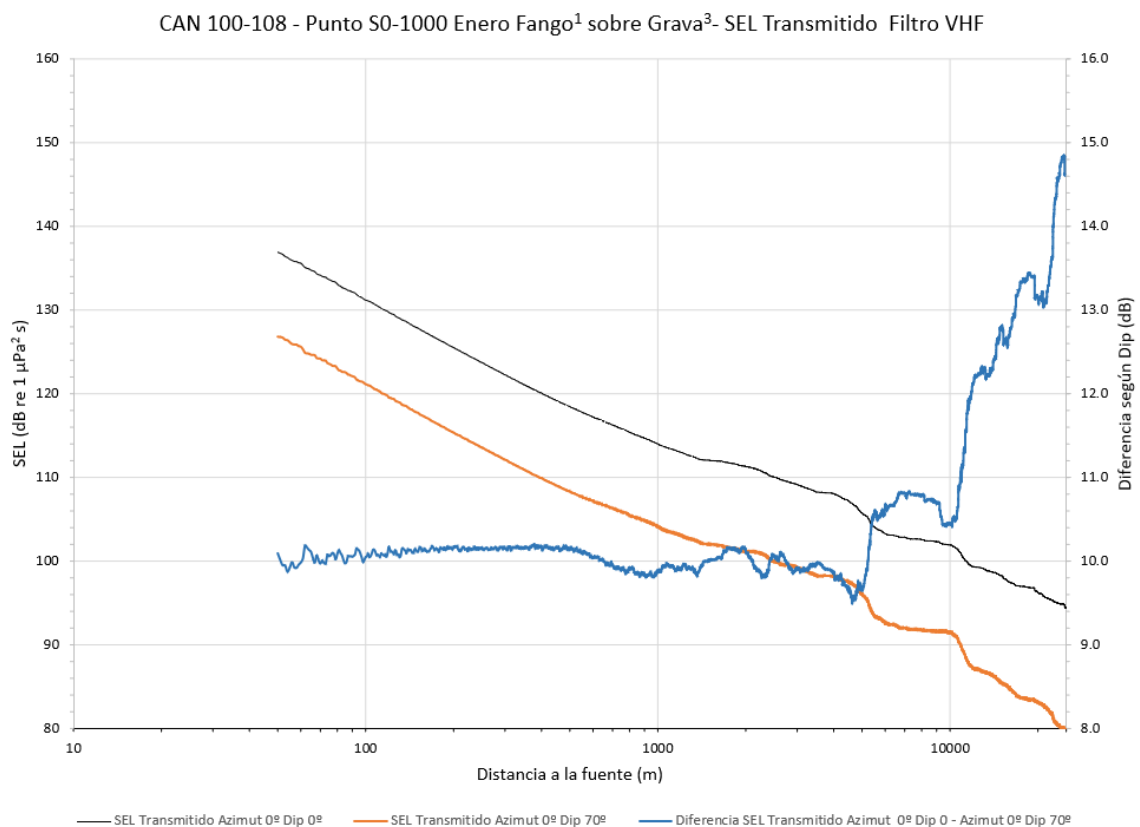


Figura 33. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0º Dip 0º-70º Filtro VHF (muy alta frecuencia)



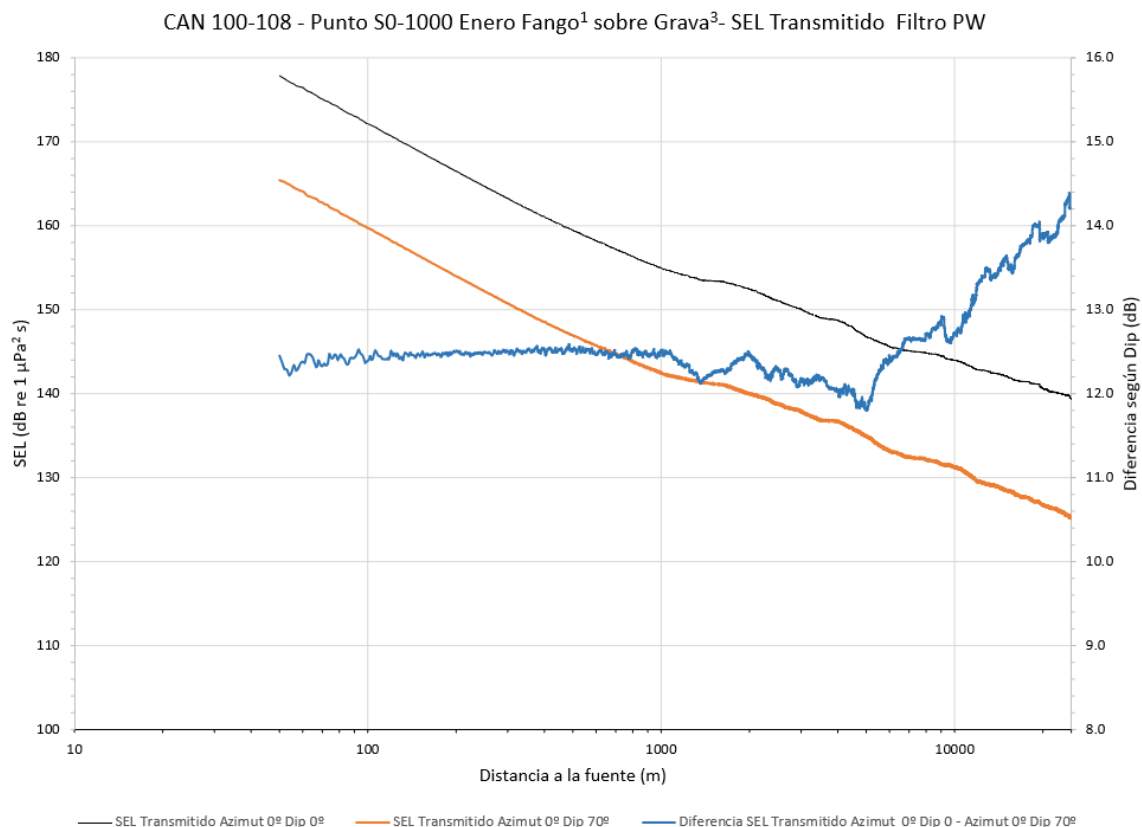


Figura 34. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro PW (Carnívoros Fócidos)

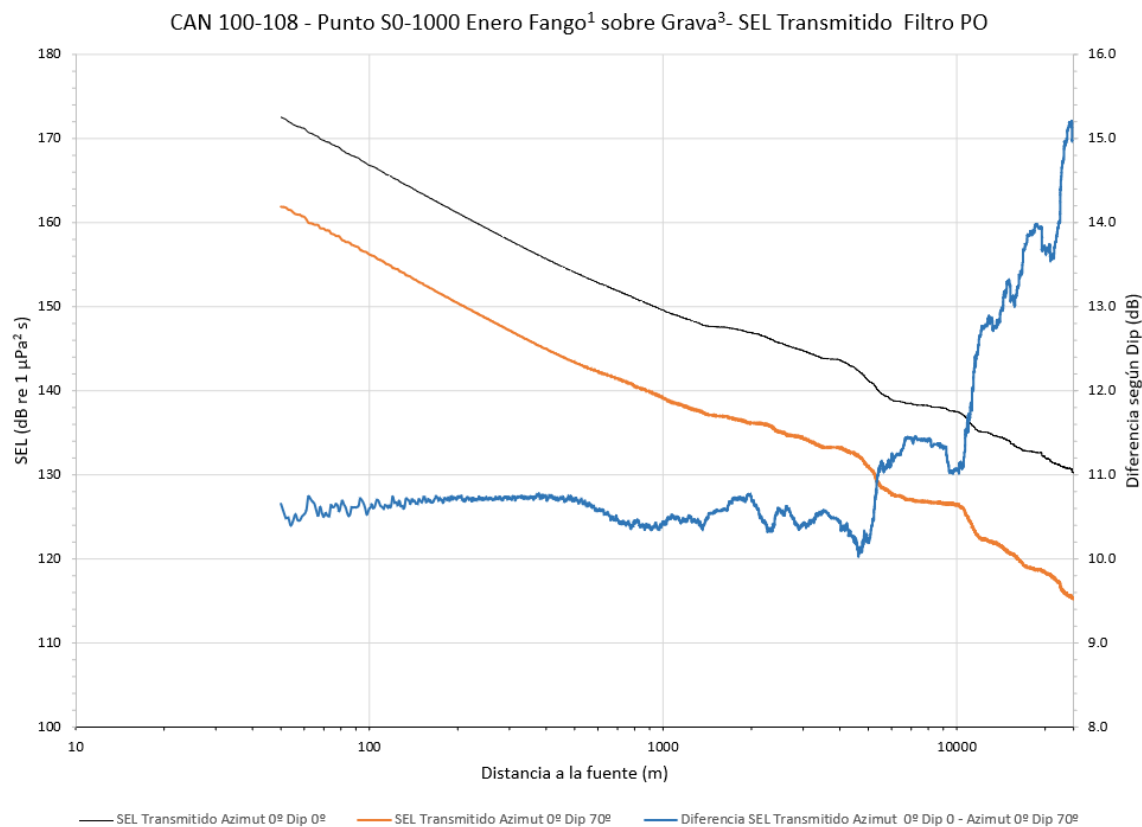


Figura 35. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro PO (Pinnípedos Otaridos)



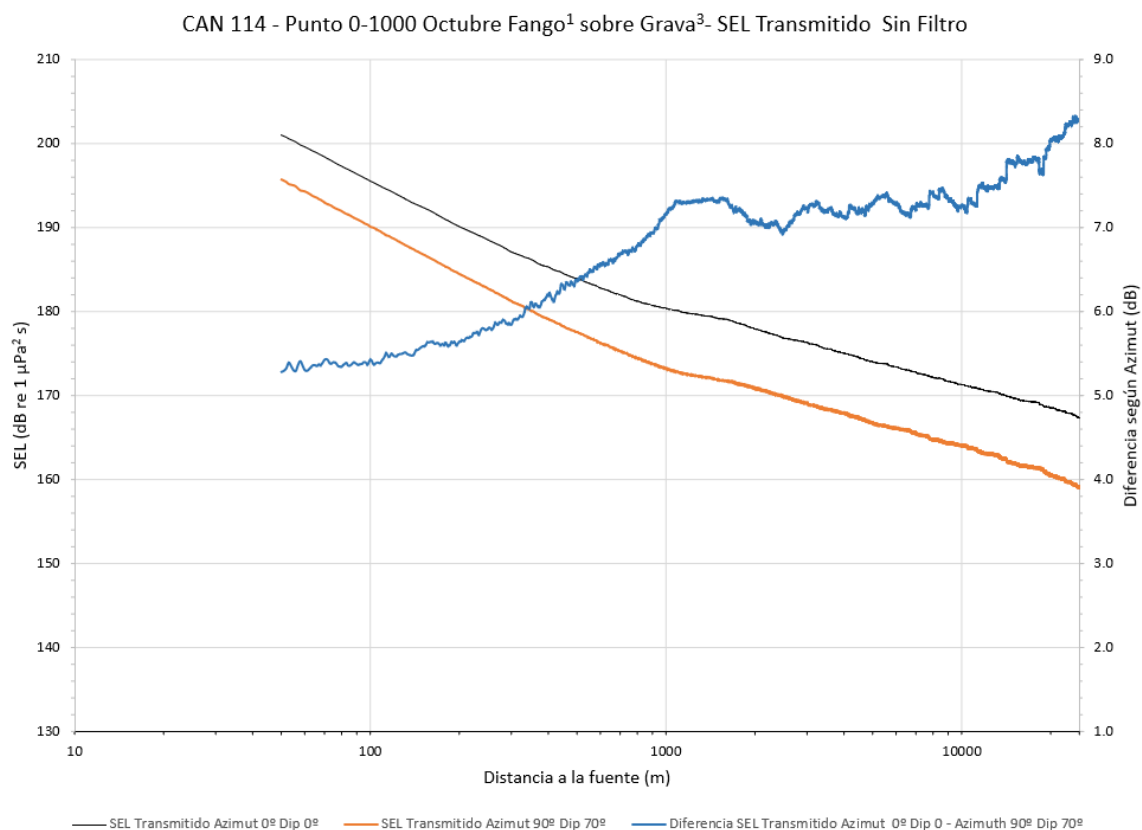


Figura 36. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Sin Filtro

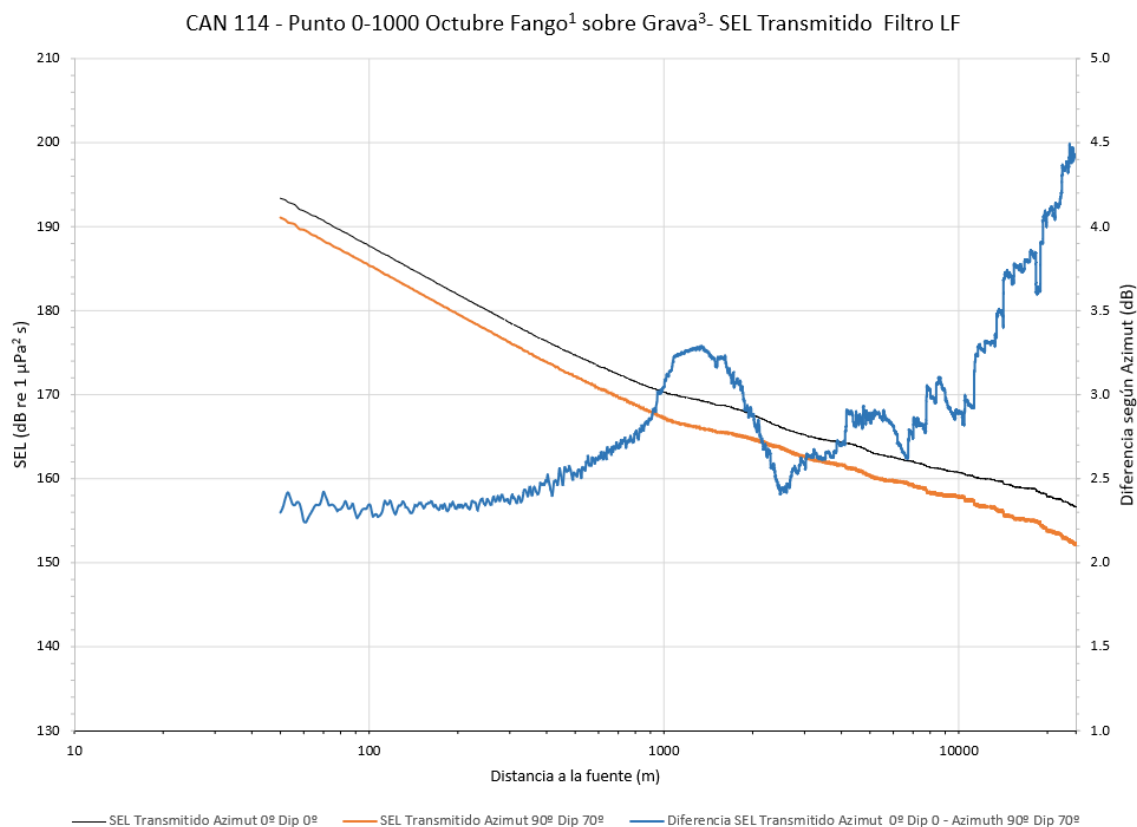


Figura 37. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Filtro LF (baja frecuencia)



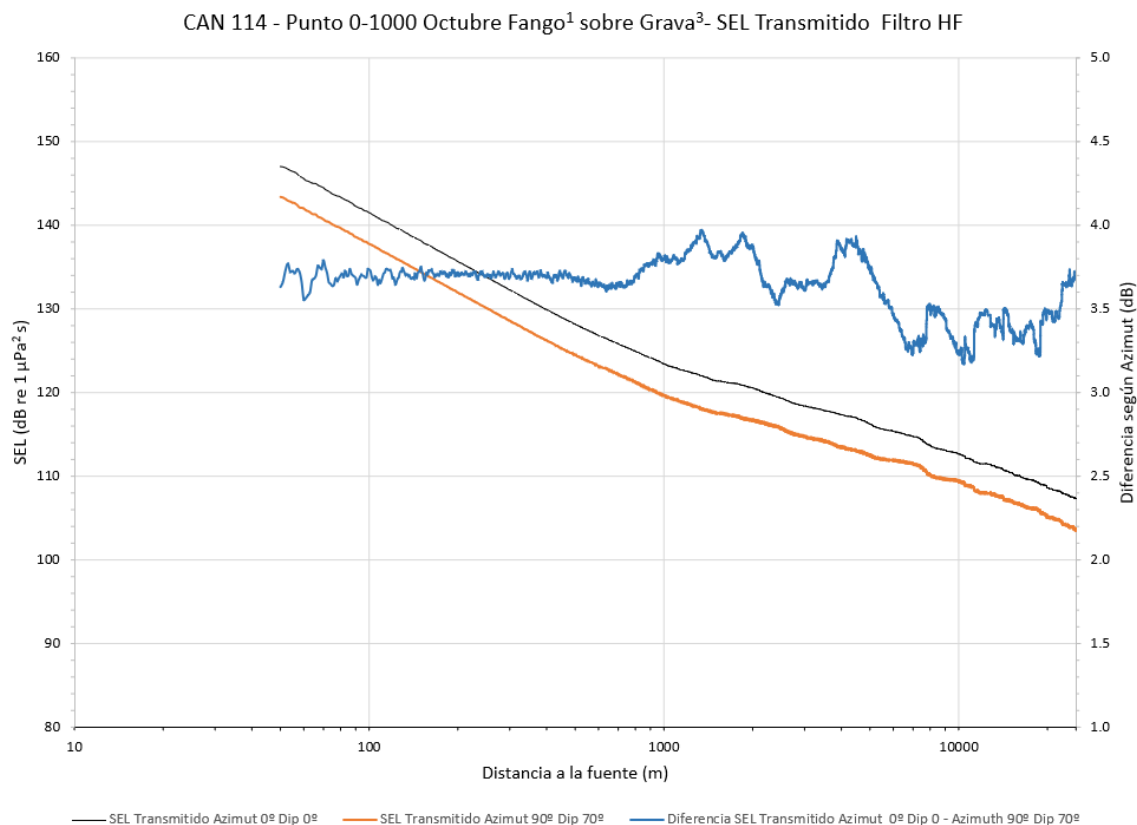


Figura 38. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Filtro HF (alta frecuencia)

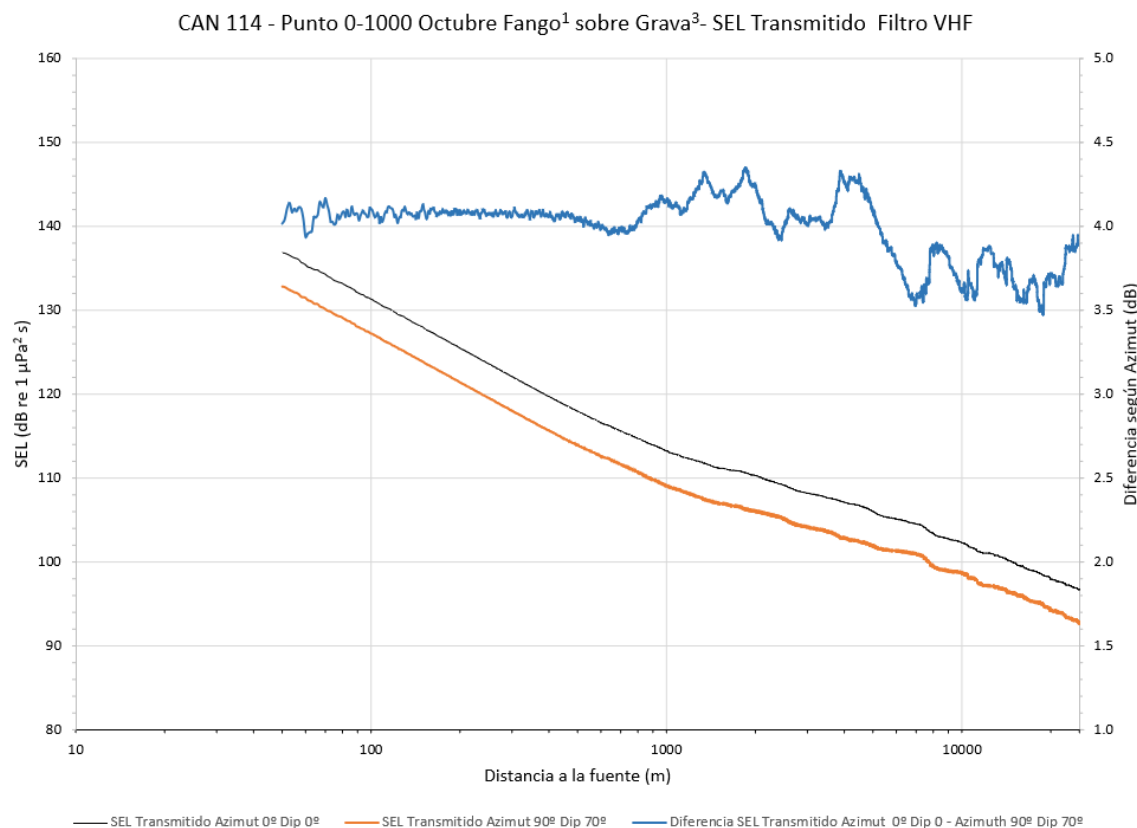


Figura 39. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Filtro VHF (muy alta frecuencia)



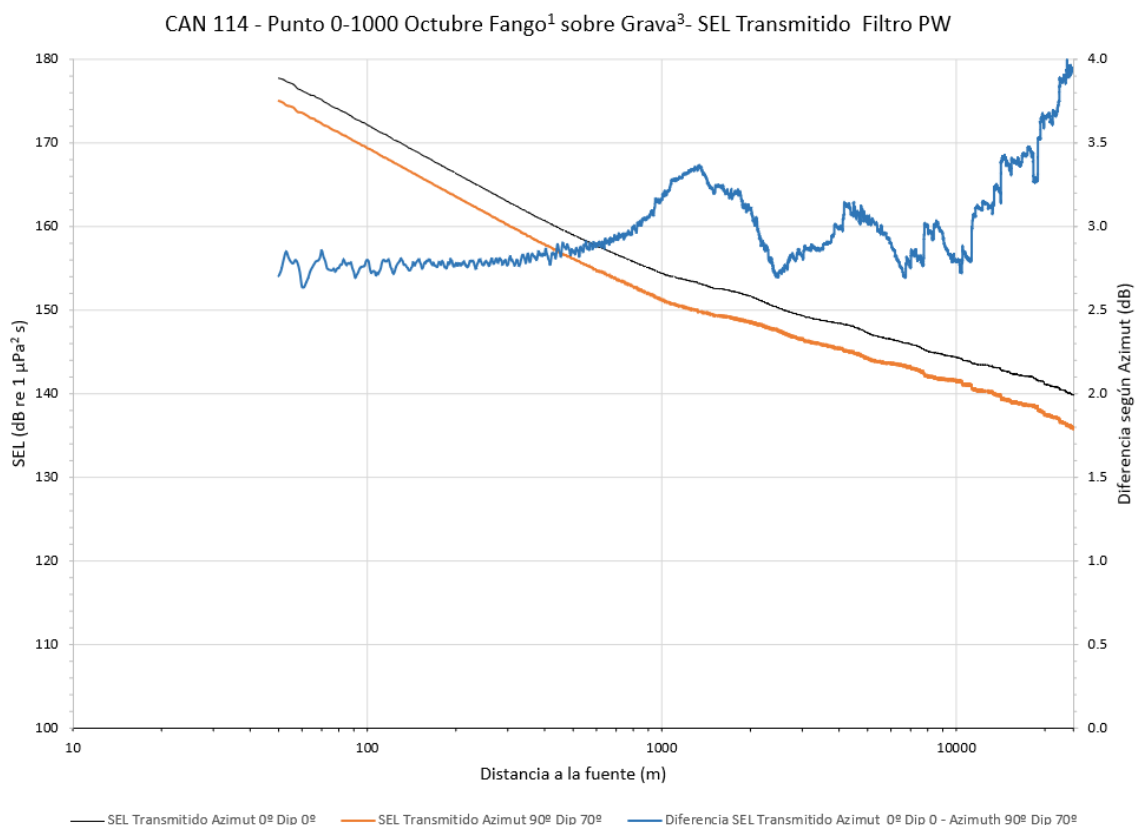


Figura 40. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Filtro PW (Carnívoros Fócidos)

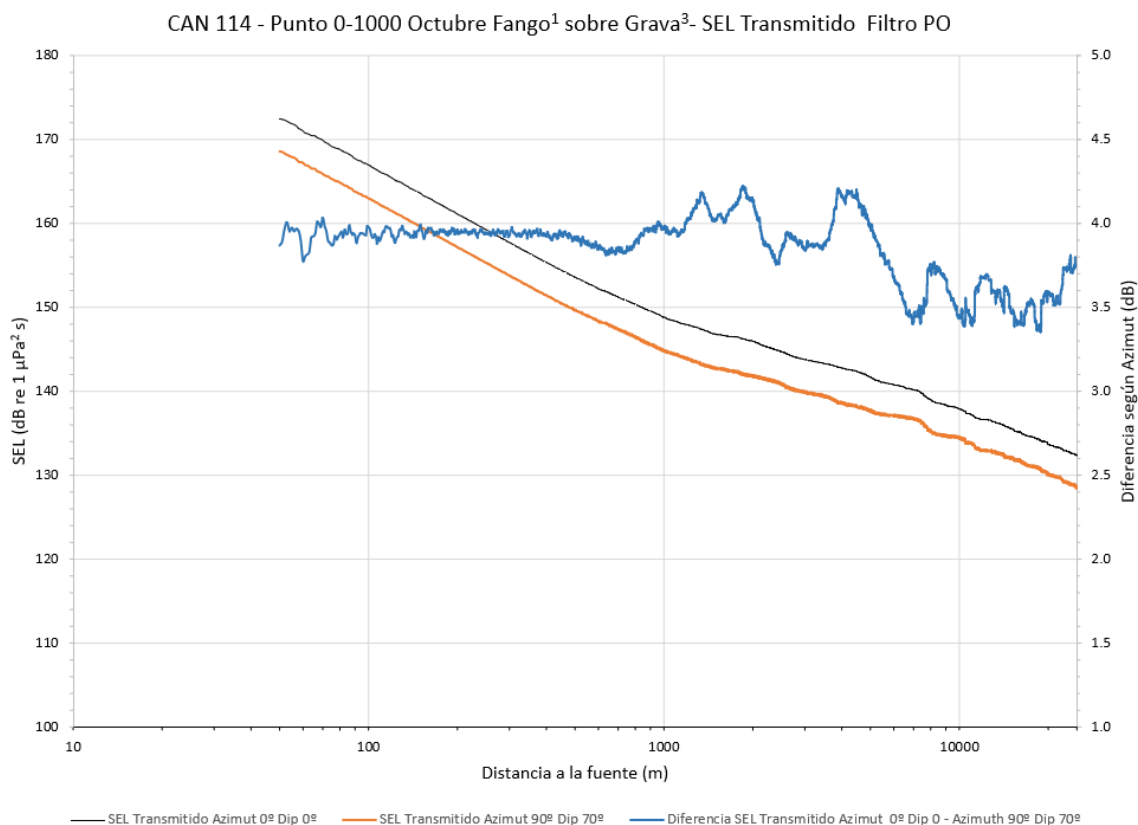


Figura 41. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° vs 90° Filtro PO (Pinnípedos Otáridos)



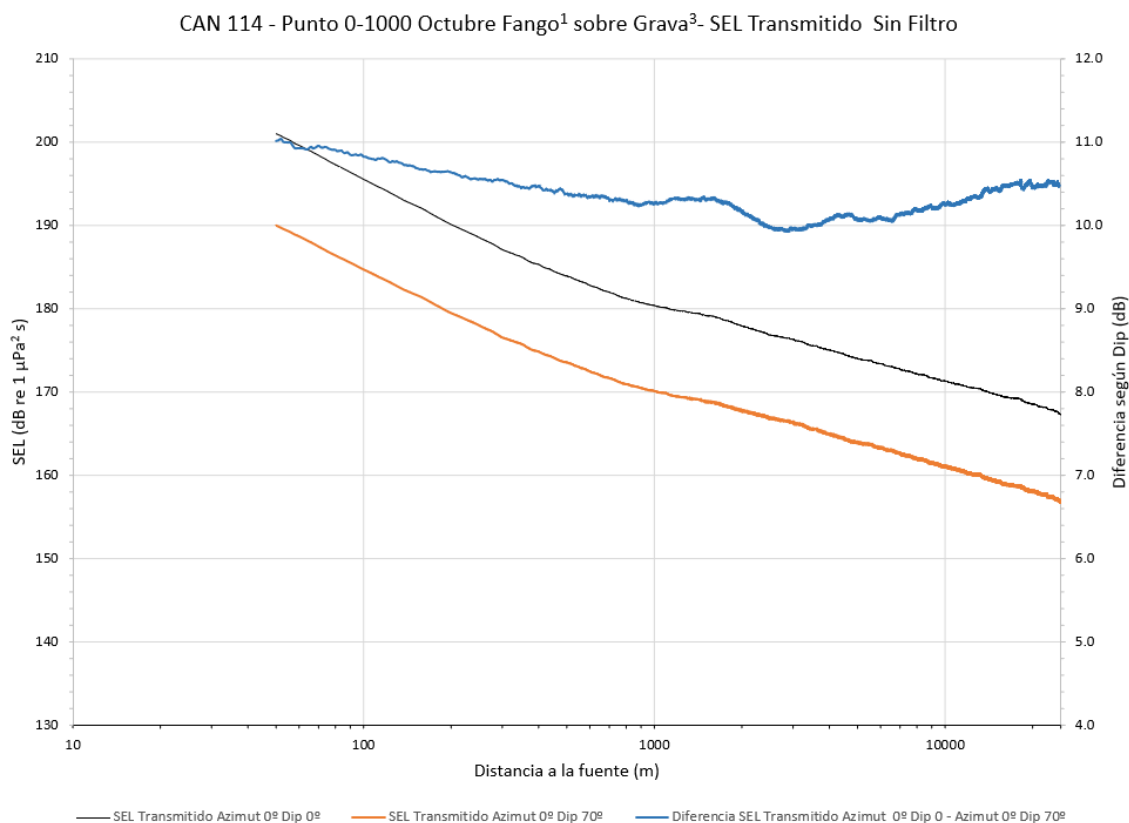


Figura 42. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Sin Filtro

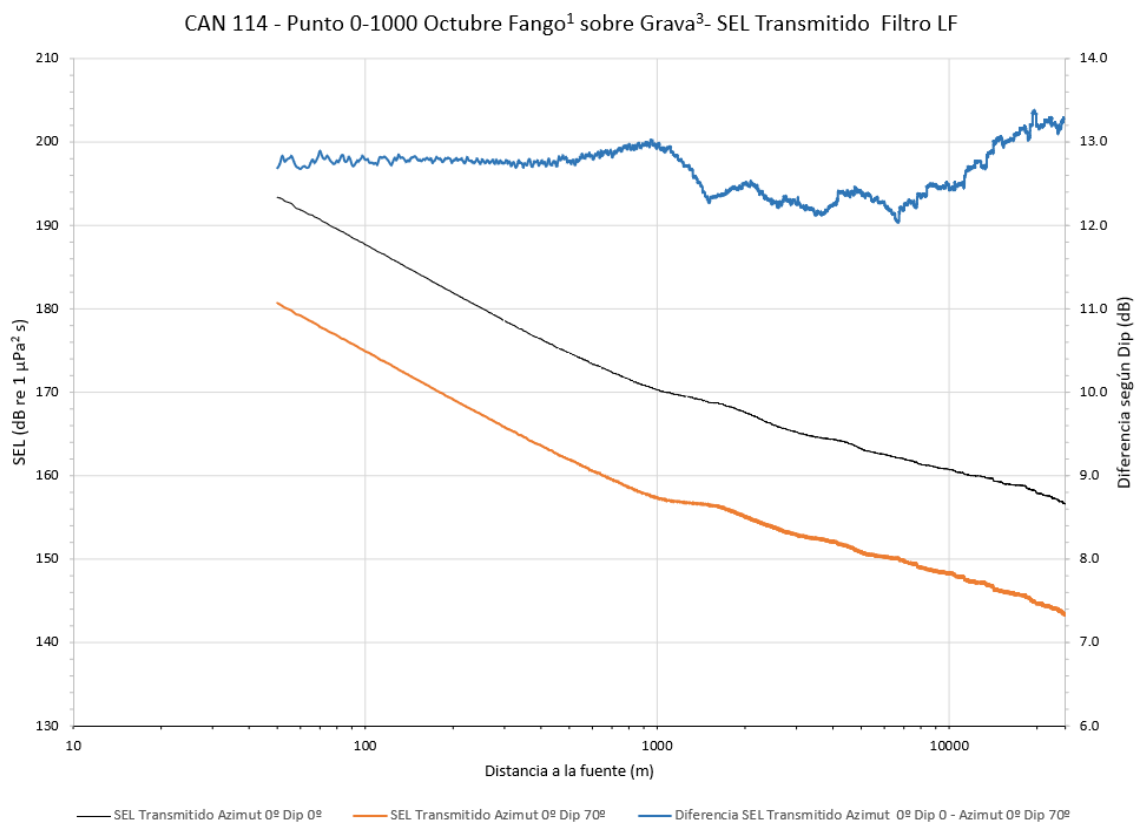


Figura 43. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro LF (baja frecuencia)



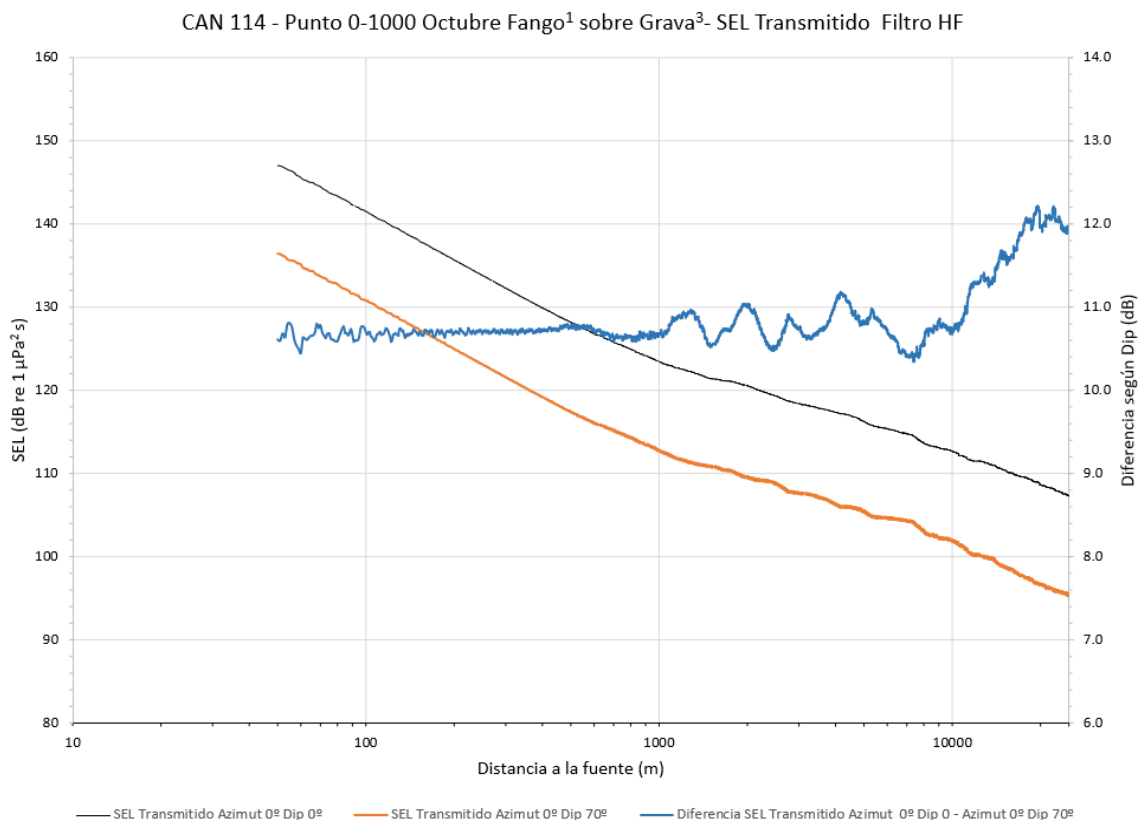


Figura 44. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro HF (alta frecuencia)

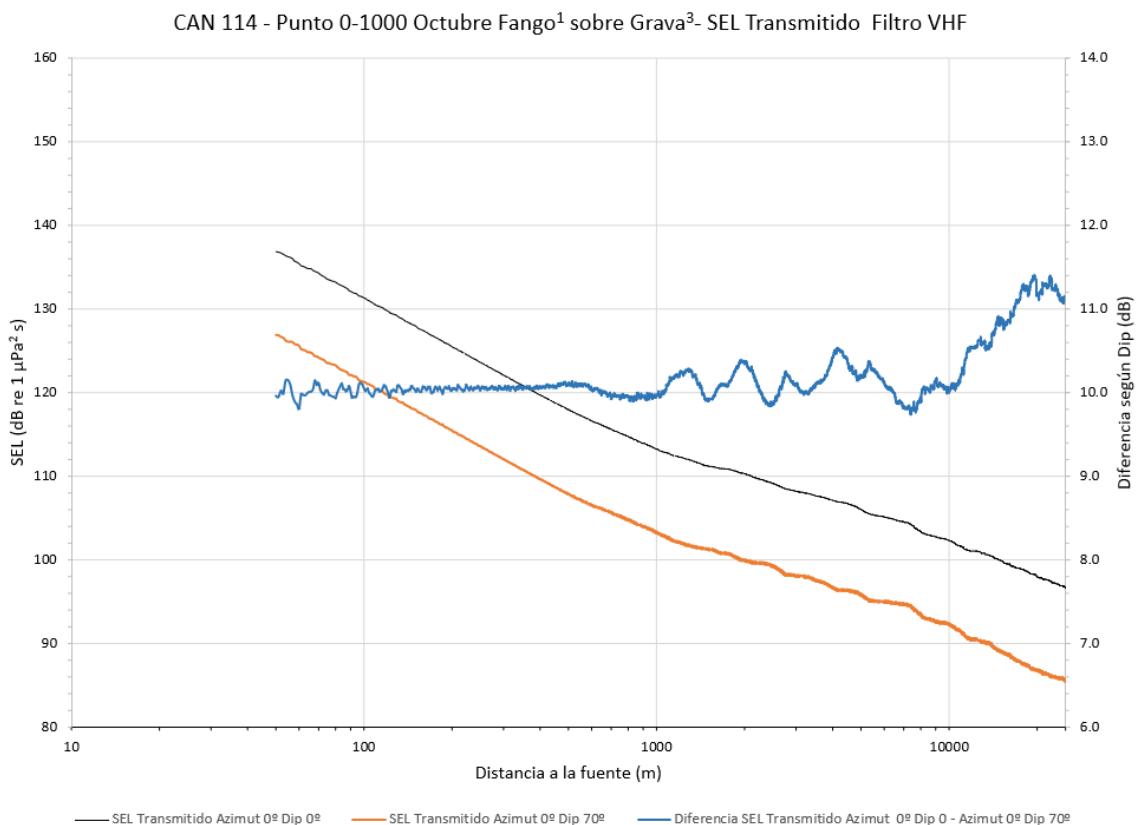


Figura 45. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro VHF (muy alta frecuencia)

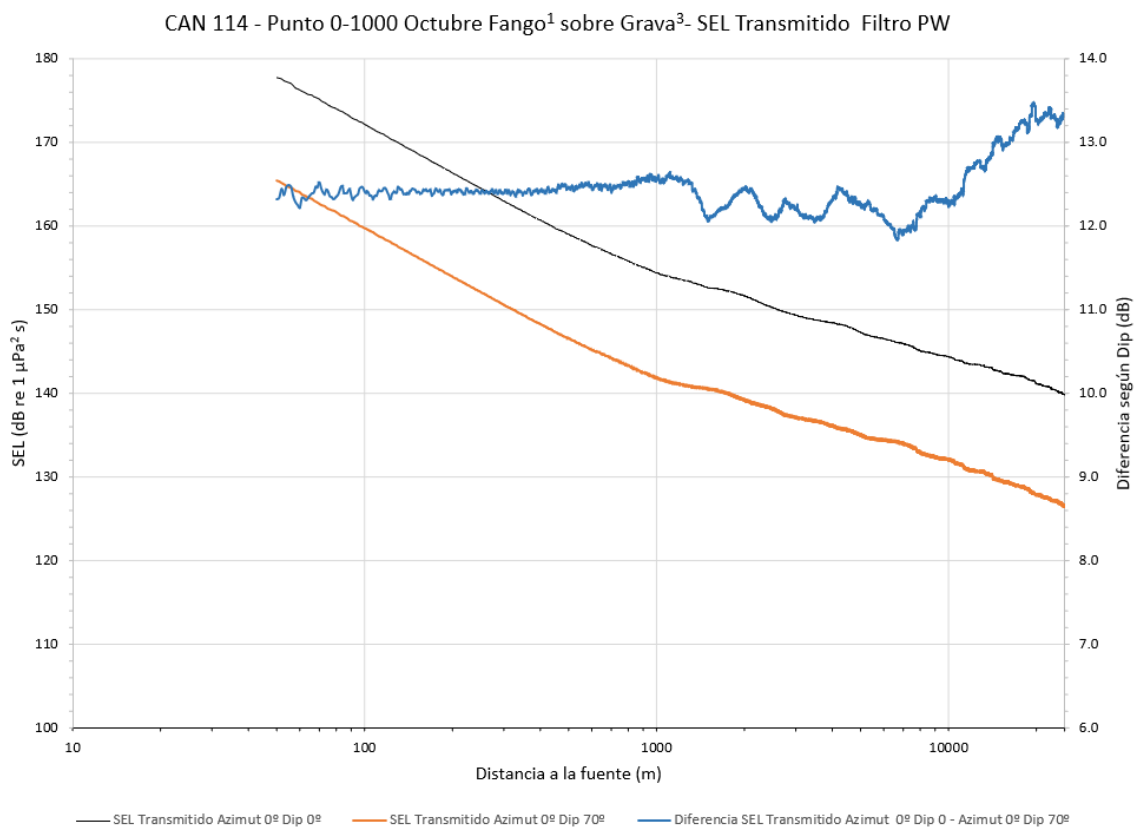


Figura 46. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro PW (Carnívoros Fócidos)

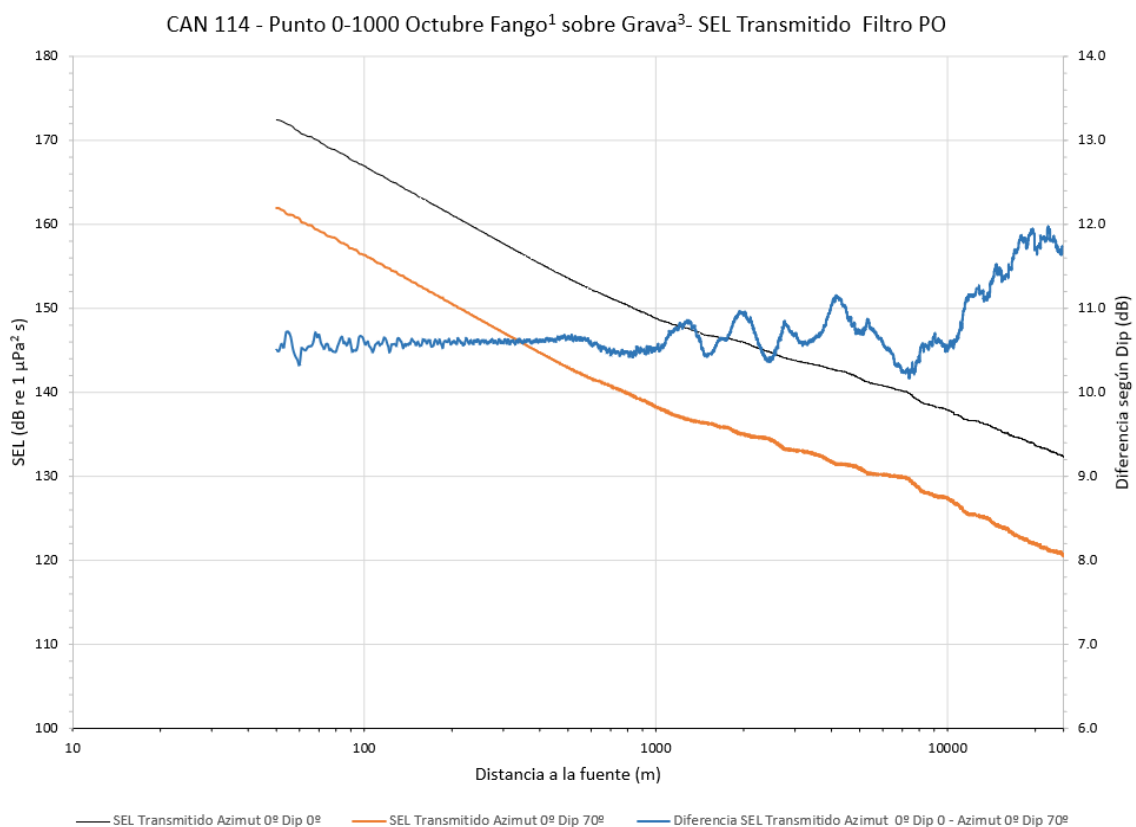


Figura 47. SEL recibido (RL). CAN_114. Azimut 0° Dip 0°-70° Filtro PO (Pinnípedos Otaridos)



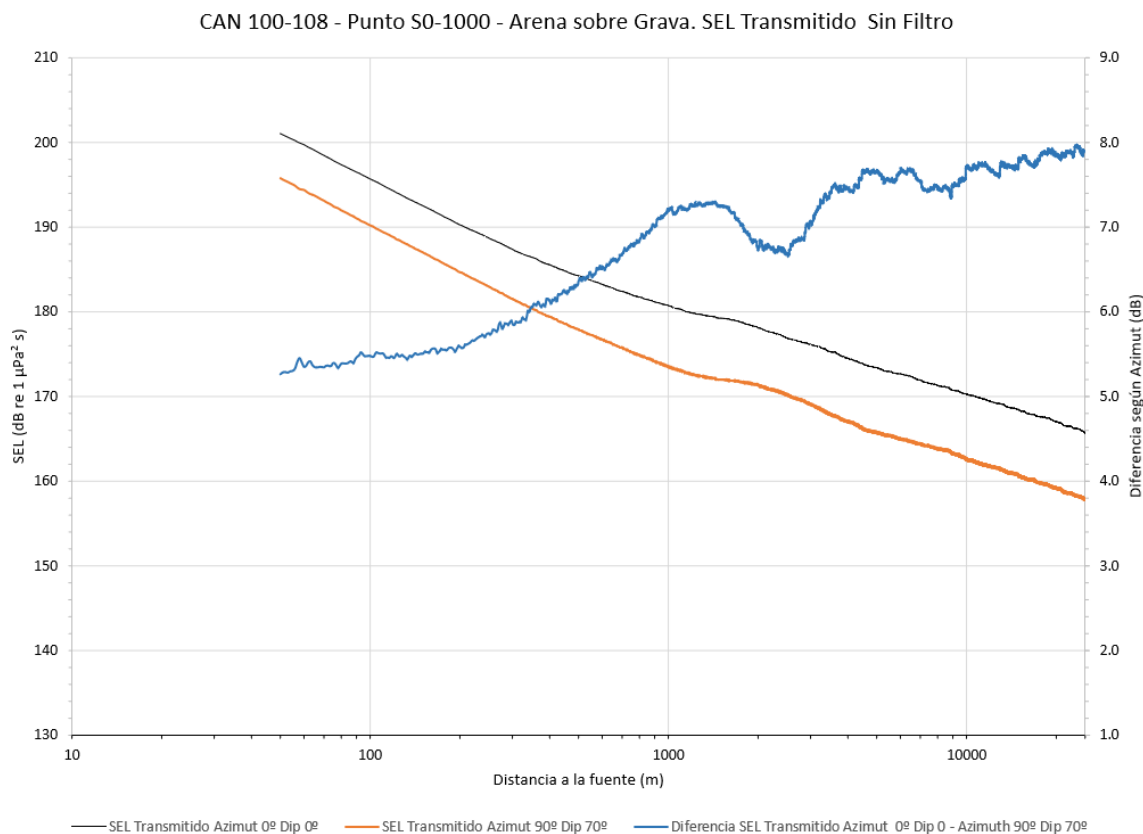


Figura 48. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° vs 90° Sin Filtro. Verificación suelo AB-GB

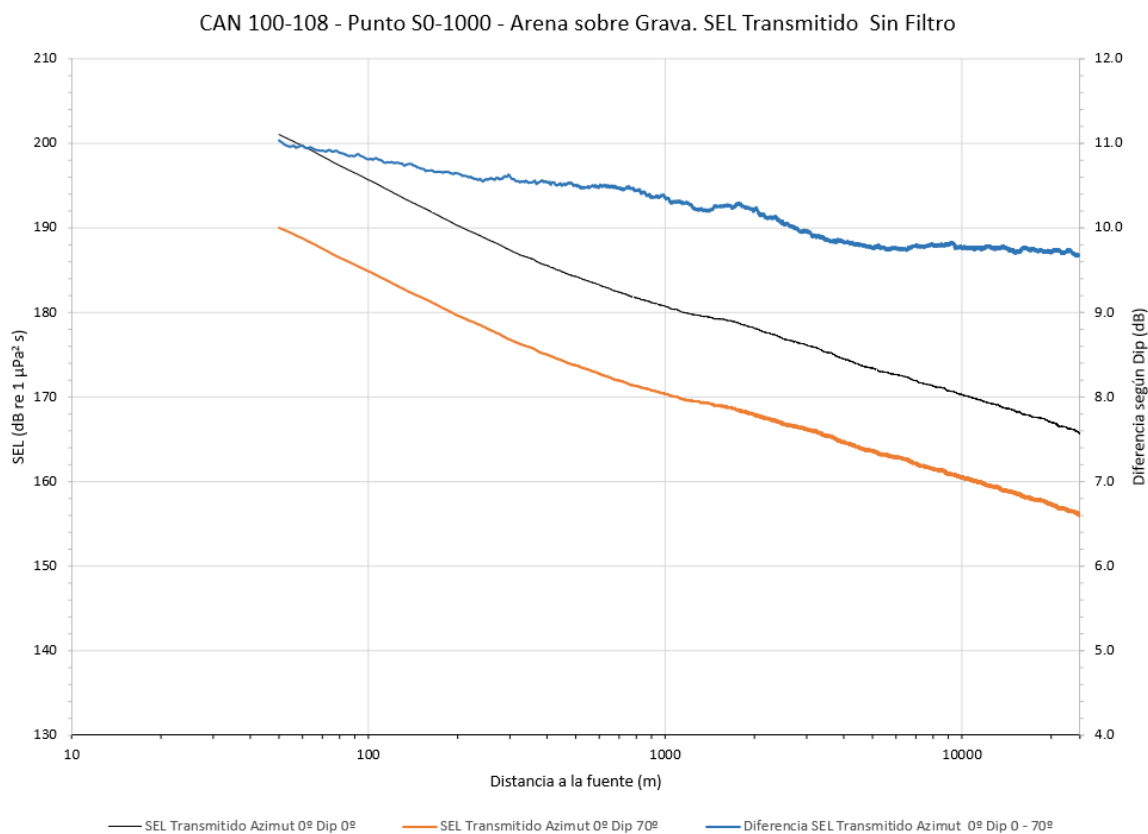


Figura 49. SEL recibido (RL). CAN_100-108. Azimut 0° Dip 0°-70° Sin Filtro. Verificación suelo AB-GB

7 EVALUACIÓN DE DISTANCIAS PARA ALCANZAR LOS UMBRALES DE SPL

A partir de los resultados de la propagación del SEL previamente presentados (valores de SEL recibido RL sin filtro), se estimaron los valores recibidos del SPL_{peak} en función de la distancia a la fuente de emisión, incrementando conservativamente en 23 dB el valor del SEL, procedimiento que se justifica en el punto 3 del presente Capítulo y en el acápite 2.9.3 del Capítulo 4.

A los efectos prácticos y ante las irregularidades que presentan las soluciones del RAM para distancias cortas y frecuencias bajas, se realizó el análisis considerando una distancia mínima de 50 metros desde el “centro” virtual del arreglo emisor.

Los cálculos de distancias fueron efectuados para CAN_100-108 considerando Suelo tipo Fango (variante de parámetros F1) sobre Grava (variante de parámetros G3) y como verificación también Suelo tipo Arena (parámetros “base” AB) sobre Grava (parámetros “base” GB). Asimismo, para ilustrar la diferencia entre las direcciones de avance del arreglo (azimut 0°) y perpendicular a la misma (Azimut 90°), se consideraron ambos casos, siempre con Dip de emisión 70°.

Para CAN_114 únicamente se consideraron las variantes de Fango sobre Gravas, dado que en esa zona no se reporta una cantidad de arena en superficie significativa (según lo descripto en el Capítulo 5).

Los resultados obtenidos muestran que para los rangos usuales para obtener los umbrales de afectación para mamíferos y peces, que son de hasta 1 km (inferiores a las profundidades de la región analizada), las diferentes hipótesis que pueden adoptarse sobre los suelos no tienen influencia práctica en las distancias resultantes para cada grupo auditivo y especie. Únicamente surgen diferencias en el “límite convencional de afectación”, que abarca distancias mayores a 1 km.

Para mayor claridad y a modo de ejemplo, se presentan en la Tabla 9 los valores de SPL_{peak} recibido para CAN_100-108 considerando para la combinación de suelos AB-GB, donde se puede contrastar la evolución a lo largo de la distancia a la fuente con los umbrales correspondientes a PTS y TTS (Southall, 2019), así como a mortalidad de peces. La única diferencia entre esta combinación y la adoptada (F1-G3) se encuentra en el límite convencional de afectación, dado que las demás distancias de hasta 1 km de la fuente son idénticas.

Como conclusión, considerando la métrica SPL se considera apropiado adoptar la distancia para PTS – VHF resultante de la condición de Azimut 90° (perpendicular a la dirección de avance del arreglo), que es ligeramente inferior a 400 m, dado que en la dirección alineada con la dirección de avance la distancia obtenida es solamente la mitad de ésta.



**Tabla 9. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados.
Área CAN_100-108, basado en Punto SO-1000**

Grupo Auditivo	SPL pK (0-p)	Suelo Fango variante F1 sobre Grava variante G3		Suelo Arena "base" AB sobre Grava "base" GB	
		Azimut 0° Dip 70°	Azimut 90° Dip 70°	Azimut 0° Dip 70°	Azimut 90° Dip 70°
	(dB re 1 µPa)	(metros)	(metros)	(metros)	(metros)
PTS – LF	219	<50	50	<50	50
PTS – HF	230	<50	<50	<50	<50
PTS – VHF	202	205	391	205	391
PTS – PW	218	<50	52	<50	52
PTS – PO	232	<50	<50	<50	<50
Peces SIN vejiga natatoria	213	50	97	50	97
Peces CON vejiga natatoria	207	106	206	106	206
TTS – LF	213	50	97	50	97
TTS – HF	224	<50	<50	<50	<50
TTS – VHF	196	514	1006	524	1006
TTS – PW	212	55	110	55	110
TTS – PO	226	<50	<50	<50	<50
Limite convencional de afectación	190	2144	4240	2200	3737

**Tabla 10. Distancias a la fuente para alcanzar los diversos umbrales y grupos auditivos evaluados.
Área CAN_114, basado en Punto O-1000**

Grupo Auditivo	SPL pK (0-p)	Suelo Fango variante F1 sobre Grava variante G3	
		Azimut 0° Dip 70°	Azimut 90° Dip 70°
	(dB re 1 µPa)	(metros)	(metros)
PTS – LF	219	<50	50
PTS – HF	230	<50	<50
PTS – VHF	202	200	377
PTS – PW	218	<50	52
PTS – PO	232	<50	<50
Peces SIN vejiga natatoria	213	50	96
Peces CON vejiga natatoria	207	104	200
TTS – LF	213	50	96
TTS – HF	224	<50	<50
TTS – VHF	196	505	945
TTS – PW	212	54	109
TTS – PO	226	<50	<50
Limite convencional de afectación	190	2149	4314



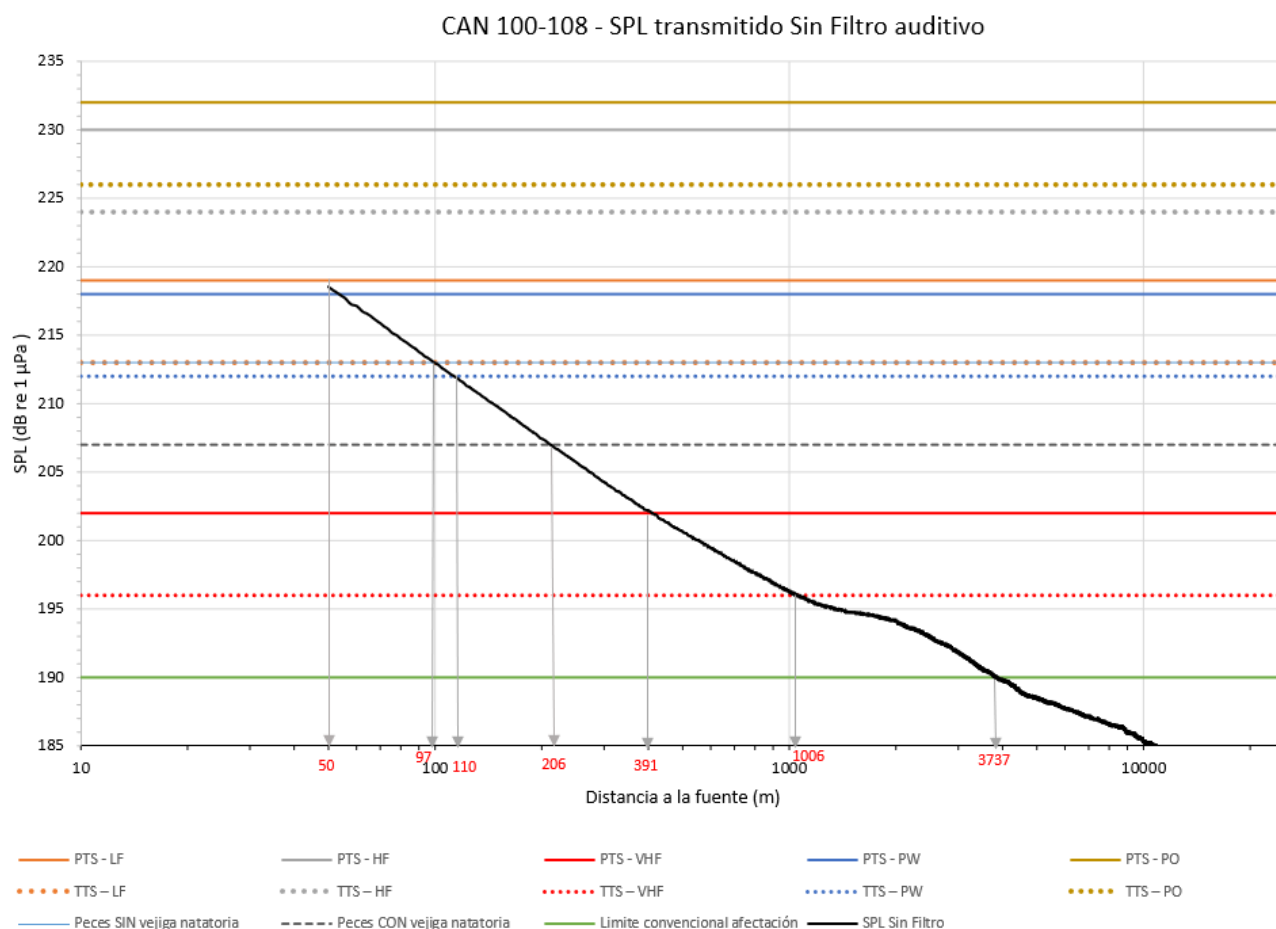


Figura 50. Ejemplo de comparación entre los valores de $SPL_{peakTOTAL}$ y los diferentes umbrales para determinar las distancias correspondientes (CAN_100-108. Azimut 90° - Dip 70° , Suelos AB-GB)

Según la métrica SPL, la distancia máxima de exclusión para la aplicación de las medidas de mitigación debe ser de 391 m y de 377 m en CAN_100-108 y CAN_114, respectivamente.

Para las secciones siguientes y el análisis del SEL acumulado (SEL_{cum}), se asumirá una distancia de exclusión para las medidas de mitigación igual a 400 m.



8 CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN ACÚSTICA (SEL) ACUMULADO

8.1 METODOLOGÍA

El procedimiento para calcular la acumulación del SEL, que se suele denominar como “SELcum” en la bibliografía, consiste en ir sumando las contribuciones de cada emisión sísmica percibidas por el animal receptor del sonido, considerando la distancia al arreglo en la que se encuentra, el rango de profundidad en que se puede encontrar, la trayectoria del mismo, y su capacidad de percepción (audiograma).

En el presente estudio debido a la metodología adoptada para el cálculo del SEL, se considera el nivel más desfavorable que pueda presentarse a cualquier profundidad entre la superficie y el lecho, por lo que este criterio conservativo comprende cualquier evolución que el receptor haga en la dirección vertical.

Los valores individuales de SEL total que integran todas las bandas de energía ($RL(SEL_{TOTAL})$) según ecuación [7], para cada emisión de aire comprimido “e”, se acumulan para todas las emisiones (N_e) que se realicen durante el período de prospección que se haya considerado.

El procedimiento consiste en sumar el SEL recibido para cada evento individual de emisión de acuerdo a la distancia “R” entre emisor y receptor y el ángulo de Azimut “α” con la trayectoria del arreglo ($RL_{R,\alpha}(e)$), obteniendo el SELcum a través de la siguiente ecuación:

$$SEL_{(ACUMULADO)} = \log_{10} \left[\sum_{e=1}^{N_e} 10^{\frac{RL_{R,\alpha}(e)}{10}} \right] \quad [8]$$

Según se indicó previamente, el valor de RL a ser considerado es el que ha sido ponderado por el audiograma correspondiente al grupo auditivo cuyo umbral de PTS o TTS se está evaluando.

En el caso de los peces, se emplea en cambio el valor sin filtrar.

Para la acumulación del SEL se considera la prospección de una línea sísmica, dado que no se justifica la acumulación por 24 horas, debido al tiempo que es necesario para relevarla y hacer el giro para pasar a la siguiente línea, a la distancia de 10 km a 10,75 km entre líneas sucesivas (indicada en el Capítulo 4), y a la movilidad de los animales potencialmente expuestos.

De acuerdo a los estudios de Línea de Base, no se registra la presencia de colonias estáticas de alguna especie, ubicadas en inmediaciones del área de relevamiento y que pudieran ser afectadas por el sonido durante varias líneas sísmicas dentro de las mismas 24 horas.

Dado que la fuente sísmica se va alejando de los receptores, llega un punto en el cual ya no se acumula más SEL en forma significativa. Por lo tanto, la acumulación se realiza durante la duración necesaria para que el valor del SELcum alcance un valor máximo y se estabilice, lo cual suele suceder luego de una hora a una hora y media aproximadamente.

Si la posición del Emisor en un instante dado viene dada por las coordenadas X_E , Y_E , y la posición del receptor por las coordenadas X_R , Y_R , la distancia “R” entre ambos se calcula simplemente mediante la siguiente ecuación:

$$R = ((X_R - X_E)^2 + (Y_R - Y_E)^2)^{0.5} \quad [9]$$

Las posiciones de emisor y receptor van cambiando en el tiempo en función de su velocidad y dirección de avance. Si se asume que el emisor avanza en dirección del eje “X”, correspondiente a Azimut 0°, su coordenada “Y” será siempre nula.



La coordenada X en cambio se irá incrementando en el tiempo, a partir del punto de arranque (asumido como $X = 0$), de acuerdo a la velocidad del buque V_B (aproximadamente 4,5 nudos).

Al respecto, se han considerado las siguientes recomendaciones de las Guías IBAMA del 2018 aplicables al arreglo bajo análisis:

- Desde el inicio del arranque suave hasta la plena potencia operativa: mínimo 20 minutos, máximo 40 minutos.
- Las operaciones de relevamiento sísmico deben planificarse para evitar emisiones innecesarias a la potencia operativa antes de comenzar una línea de reconocimiento y para programar las operaciones para comenzar la recopilación de datos lo antes posible una vez que se alcance la potencia operativa completa.
- Si se espera que los cambios de línea demoren más de 20 minutos (en este caso alcanzan casi 4 horas), independientemente del volumen de emisión:
 - Las emisiones deben terminarse al final de la línea de levantamiento;
 - Se realizará una búsqueda previa al inicio del arranque suave durante el cambio de línea programado;
 - El arranque suave se retrasará si se ven mamíferos marinos y tortugas dentro de la zona de exclusión durante la búsqueda previa al disparo; y
 - Se debe realizar un arranque suave completo antes del inicio de la siguiente línea.

El procedimiento a aplicar se describe en detalle en el Capítulo 8 (ver 2.1 PROGRAMA DE OBSERVADORES DE FAUNA MARINA A BORDO).

A medida que el receptor se mueve con una velocidad V_R modificando su posición espacial según el ángulo de su trayectoria con respecto al avance del buque, se produce una emisión de energía sonora cada aproximadamente 6,5 segundos, con lo cual a una velocidad V_E de 4,5 nudos (2,3 m/s) el arreglo habrá avanzado 15 metros en dirección X positiva. De esa manera, continuamente se va modificando la distancia "R" entre ambos y el Azimut del receptor con respecto a la posición instantánea del emisor.

El esquema geométrico de cálculo implementado para acumular el SEL durante el período de escape del receptor es el siguiente:



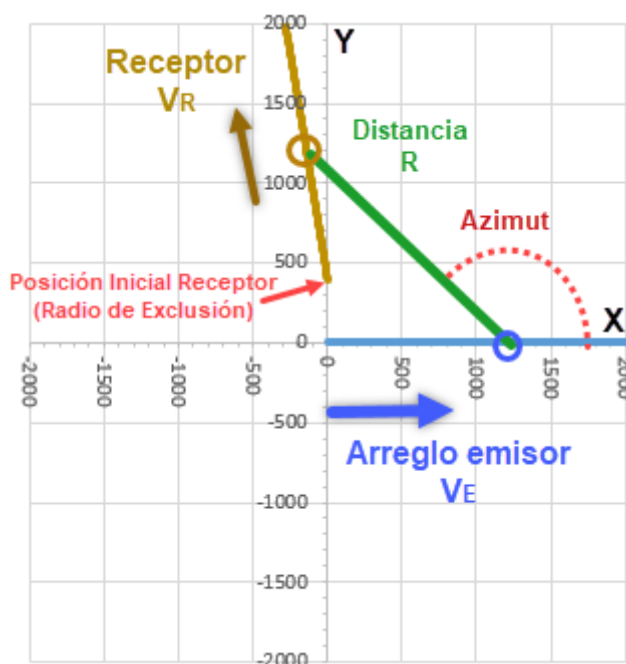


Figura 51. Esquema geométrico utilizado para el cálculo del SELcum

La información disponible sobre las posibles reacciones de los mamíferos marinos ante las emisiones sísmicas, presentada en el el parágrafo 2.1.1 “Antecedentes de los potenciales efectos sobre la biota marina asociados a la emisión de energía sonora” del Capítulo 5 y en el parágrafo 4.2.1.2 “Comportamiento evasivo de los mamíferos marinos” del Capítulo 7, muestran que realizan trayectorias de evitación, pudiendo sostener velocidades del orden de 4 m/s durante períodos de aproximadamente media hora, manteniendo luego velocidades en el entorno de 2 m/s. Para el presente estudio únicamente se consideró una velocidad constante de 2 m/s para el escape del receptor. Para acumular el SEL se deben plantear hipótesis plausibles sobre la interrelación de las trayectorias del receptor y del emisor. Considerando los antecedentes disponibles y la información brindada en los parágrafos del Capítulo 5 y del Capítulo 7 previamente citados, se consideró que el receptor seguirá trayectorias con direcciones opuestas o perpendiculares a la dirección de avance del arreglo, de tal manera que lo alejen del punto de emisión.

Los resultados precedentes de evolución del SEL y del SPL, así como los gráficos polares de distribución angular de la energía sonora para frecuencias en octavas (32, 63, 125, 250, 500, 1.000 Hz) presentados en la Figura 29 del Capítulo 4, muestran claramente que cuando el receptor se encuentra en la zona cuyo azimut con respecto a la posición y dirección de avance del arreglo es cercana a los 90° / 270° , la energía emitida para frecuencias altas (125 Hz en adelante) es mayor que para azimuts más alineados con la dirección de avance (0° - 180°). Esta mayor emisión de energía está limitada a una zona de $\pm 30^\circ$ con respecto al Azimut 90° / 270° , mientras que fuera de ese rango, se registra en algunas frecuencias un descenso de la energía emitida con respecto tanto al Azimut 0° como 90° (por ejemplo, alrededor de 45° , 135° , -45° y -135°).

Por esa razón, para adoptar una posición razonablemente conservativa en función de los diagramas polares de emisión, se realizó un análisis combinado, considerando no sólo la distancia entre emisor y receptor para acumular el SEL de cada disparo, sino el ángulo (Azimut) relativo, adoptando el resultado para Azimut 90° si el ángulo está comprendido entre 60° y 120° (o los mismos valores negativos), y Azimut 0° en el resto de los ángulos (0° a 60° y 120° a 180°).



Cuando se considera el procedimiento de arranque suave, si bien es posible especificar que al principio los tiempos para el encendido de cada combinación sean más lentos que al final del proceso, se ha considerado en este caso particular que cada paso del encendido de las fuentes modelado por Nucleus se realiza en el mismo intervalo de tiempo que el anterior. Con respecto a la duración del arranque suave, para este análisis se analizó la influencia de considerar 20 o 40 minutos, en los límites del intervalo recomendado.

Dado que finalmente los resultados obtenidos para CAN_100-108 son similares a los obtenidos para CAN_114, los análisis de sensibilidad se presentan únicamente para la primera área.

Con respecto a los escenarios planteados, cabe recordar que según Southall (2019) existen dos condiciones para definir la zona de exclusión, basadas una en el SPLpeak no filtrado, y la otra en el SEL acumulado (métrica dual). Por consiguiente, habiendo definido a través del SPLpeak una distancia mínima de exclusión de 400 metros al inicio del arranque suave, no tiene sentido práctico plantear distancias menores para la evaluación del SELcum, por lo que solamente se plantearán escenarios de verificación de la superación de los umbrales de SELcum con esta distancia inicial.

En primer lugar, para ilustrar el proceso de acumulación y la influencia de realizar, o no, el procedimiento de arranque suave, se muestran los pasos de acumulación del SEL en el caso particular en que el cetáceo se encuentre a 400 m de distancia del centro del arreglo, ubicado inicialmente en la dirección opuesta al avance de este, y que se desplace con una velocidad de 2 m/s cuando se inicia el arranque suave. Se asume además que en este ejemplo ilustrativo el cetáceo se detiene al finalizar el arranque suave (habiendo recorrido casi 5 km), dado que el arreglo se está alejando del mismo (la distancia al receptor es de casi 11 km) y el SEL recibido en cada emisión es bajo y cada vez menor. El azimut es siempre 0° durante todo el tiempo.

Con todas estas hipótesis, se tienen los siguientes resultados:

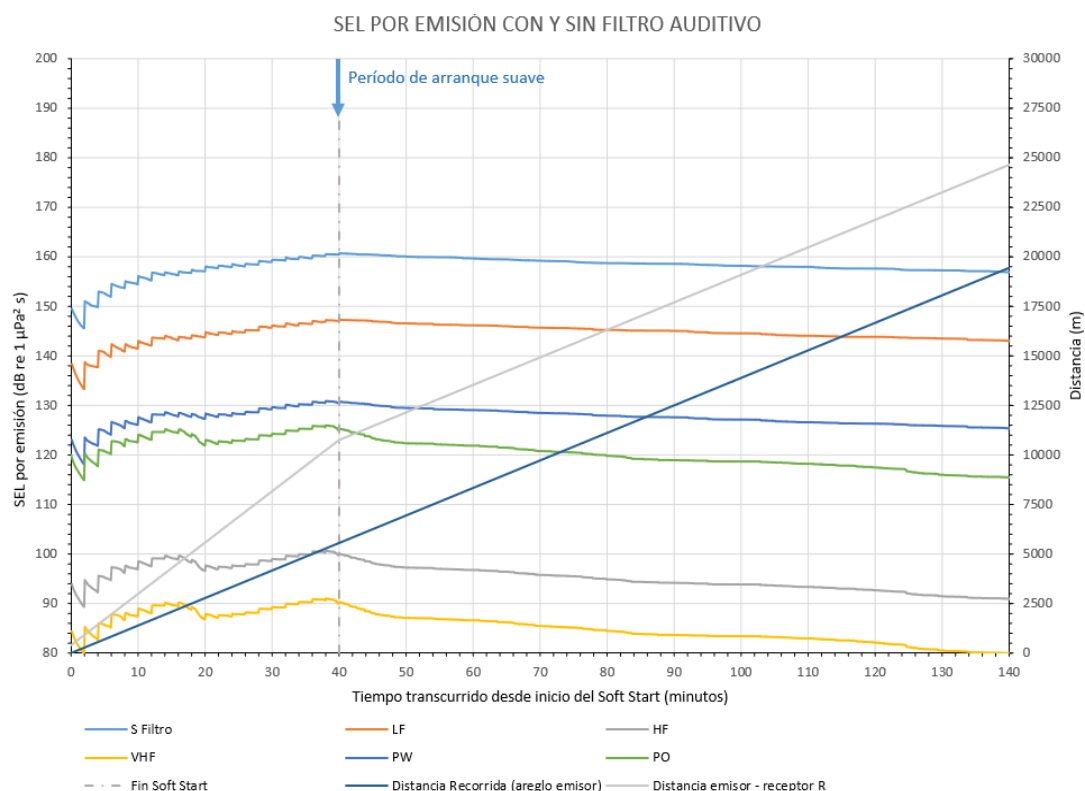


Figura 52. CAN_100-108. SEL recibido por cada emisión. Soft Start 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Soft Start únicamente.

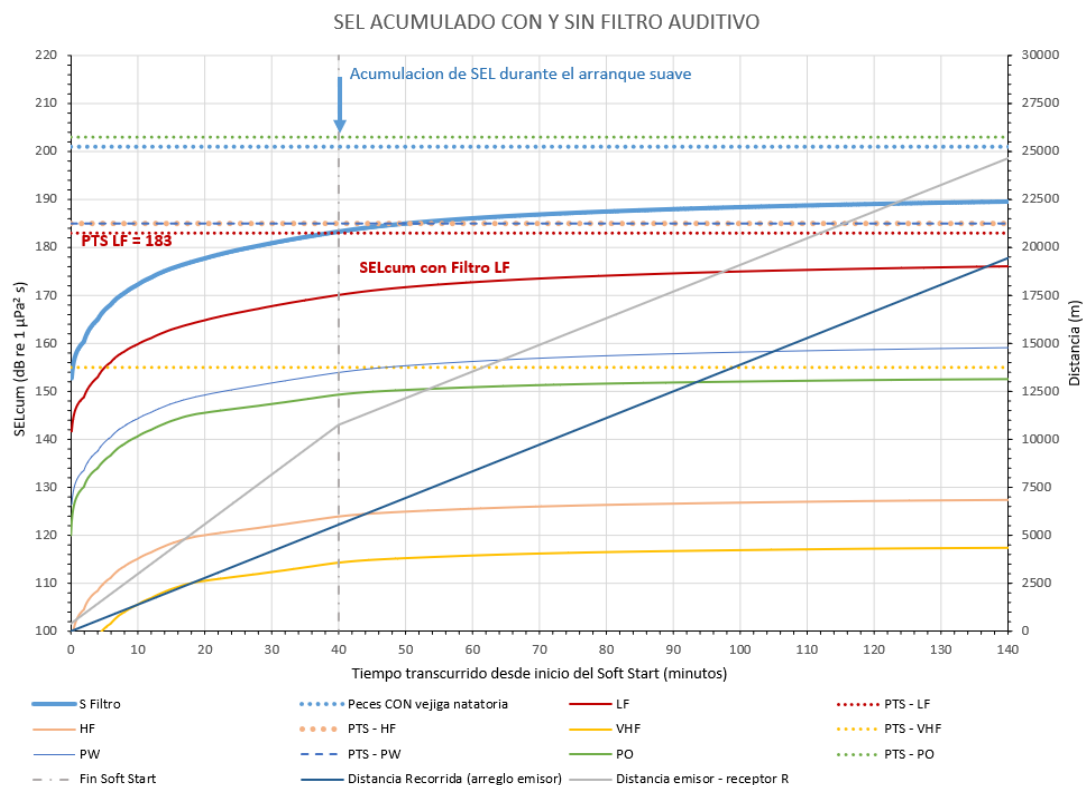


Figura 53. CAN_100-108. SEL acumulado. Soft Start 40 minutos. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante el Soft Start únicamente.

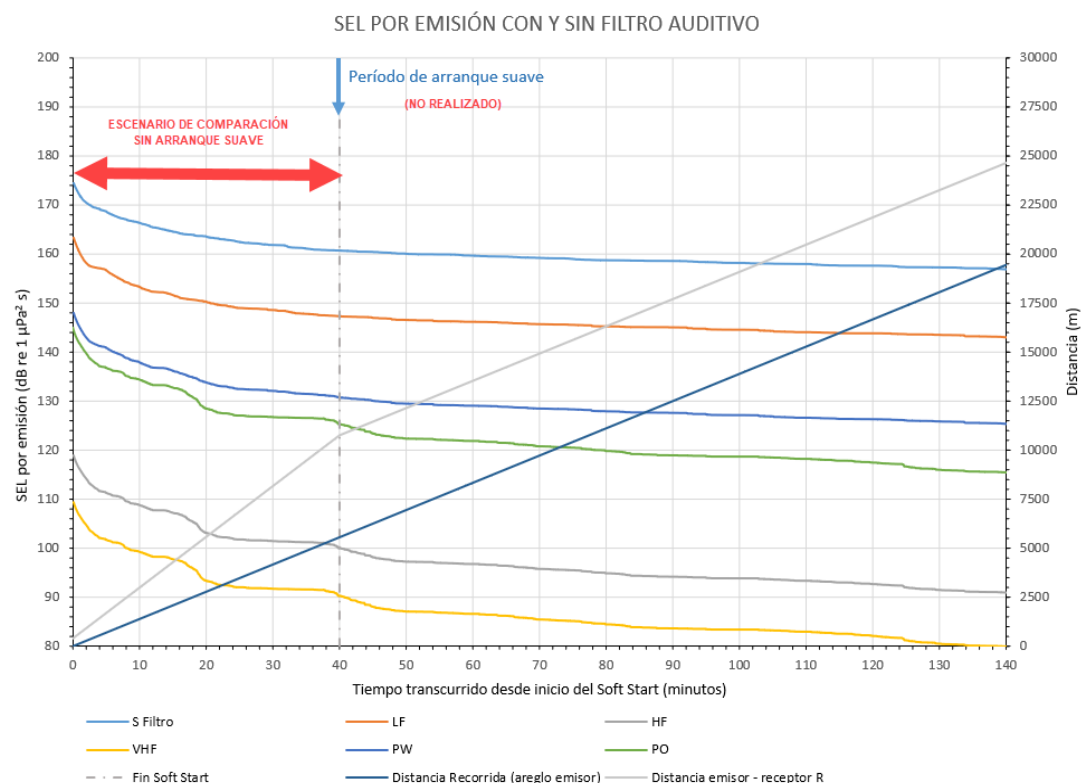


Figura 54. CAN_100-108. SEL recibido por cada emisión. Simulación de comparación SIN Soft Start. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante 40 minutos.



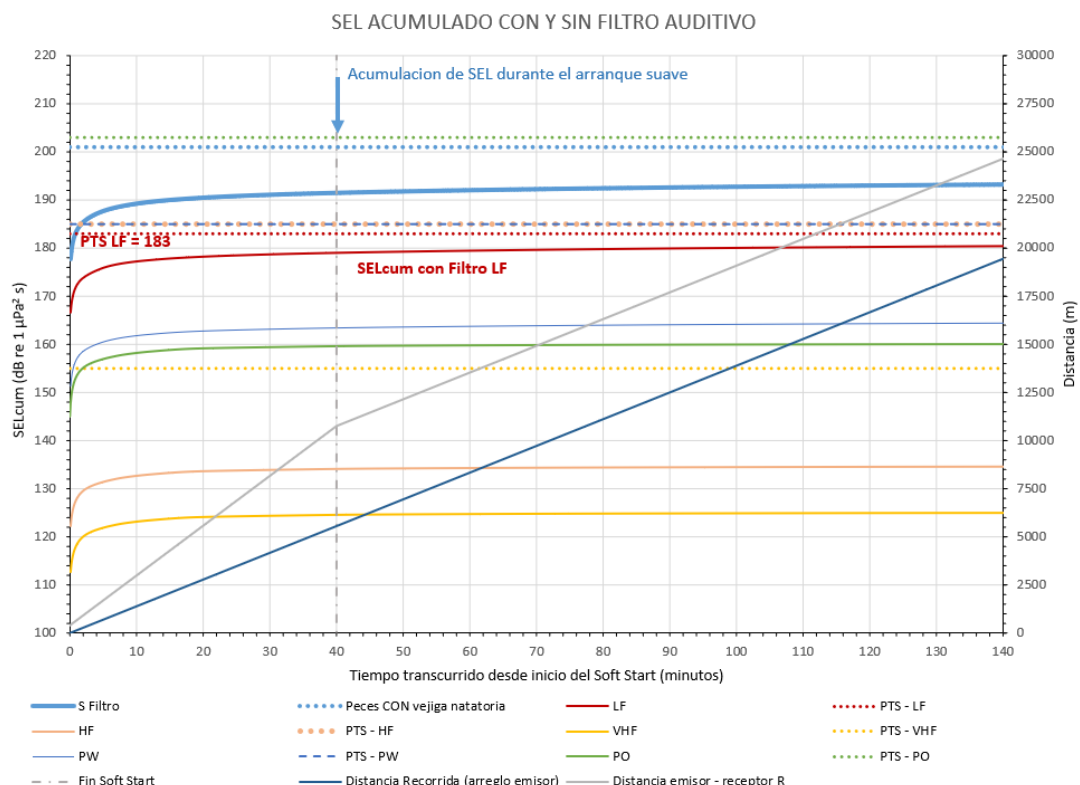


Figura 55. CAN_100-108. SEL acumulado. Simulación de comparación SIN Soft Start. Azimut movimiento del receptor 180° a 2 m/s durante 40 minutos.

La **Figura 52** muestra la lenta progresión del SEL recibido durante el arranque suave. Se puede visualizar un incremento brusco que se produce cada vez que se activa una combinación adicional de emisores, seguido de períodos de decaimiento durante los cuales el SEL recibido va descendiendo debido al incremento de la distancia R entre emisor y receptor. Al final del período de Soft Start se alcanza el máximo de SEL recibido, y luego en cada emisión (cada 6,5 segundos) el SEL recibido va descendiendo mientras se incrementa la distancia R.

La **Figura 53** ilustra el SEL acumulado que se obtiene sumando (en el dominio lineal) el SEL de cada una de las emisiones efectuadas, como se explicó previamente (ecuación [2]). El SELcum que en este caso más se acerca al valor de PTS es el correspondiente a mamíferos de grupo auditivo bajo (LF). Siendo PTS LF = 183 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$, el SELcum alcanza solamente 176,1 re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$, 6,9 dB más bajo. Esa acumulación incluye 170,1 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$ que se acumulan durante el período de arranque suave.

A modo de comparación para mostrar la influencia del arranque suave, se calculó el SEL recibido y acumulado para la hipótesis teórica en que no se efectuara esa medida de mitigación. La **Figura 54** ilustra como sería el SEL recibido durante esos 40 minutos, pudiéndose apreciar como desciende sistemáticamente desde un valor máximo que se tendría si, con el receptor a una distancia de 400 metros del emisor, se comenzara a emitir sonido con la máxima potencia.

A su vez, la **Figura 55** muestra el Sel acumulado bajo esa hipótesis, que alcanzaría un total de 180,4 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$, es decir, 4,3 dB mayor que con el arranque suave. Si bien en este ejemplo no se alcanza el valor de PTS LF, queda claro que la mayor acumulación de SEL durante el período correspondiente al arranque suave si se emitiera a plena potencia (que alcanza 179,0 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$), termina provocando un mayor SEL total acumulado, por lo que una situación que con el arranque suave no provocaría superación del PTS, podría superarlo si el arranque suave hipotéticamente no se efectuara.



Para evaluar si la distancia de exclusión de 400 m surgida de la métrica SPL es suficiente para que no se supere el PTS para la métrica SELcum, se plantearon y analizaron diversos escenarios de interrelación entre el arreglo emisor y el receptor (en primer lugar para CAN_100-108).

Los escenarios más desfavorables planteados son los siguientes:

- E1: el receptor se encuentra justo en la línea de avance del arreglo al principio del arranque suave ($X_R = 400$ m, $Y_R = 0$ m), y escapa perpendicularmente a la dirección de avance del arreglo (90°) con una velocidad de 2 m/s.
- E2: el receptor se encuentra en un punto perpendicular a la línea de avance del arreglo al principio del arranque suave ($X_R = 0$ m, $Y_R = 400$ m), y escapa perpendicularmente a la dirección de avance del arreglo (90°) con una velocidad de 2 m/s.

Con estas hipótesis el SELcum obtenido no supera los valores de PTS para ninguno de los grupos auditivos, como se muestra a continuación.

Cualquier ángulo de escape en dirección contraria al avance del arreglo ($>90^\circ$) genera un SELcum menor al obtenido con las hipótesis previas. Si bien hay un rango de ángulos de escape en dirección al avance del arreglo ($<90^\circ$) para los cuales no se supera el PTS LF (que es la condición más restrictiva), no se considera realista que el receptor mantenga esas trayectorias durante un tiempo prolongado, dado el comportamiento evasivo de los mamíferos marinos.

Las figuras siguientes ilustran la acumulación del SEL para las diferentes condiciones ensayadas.

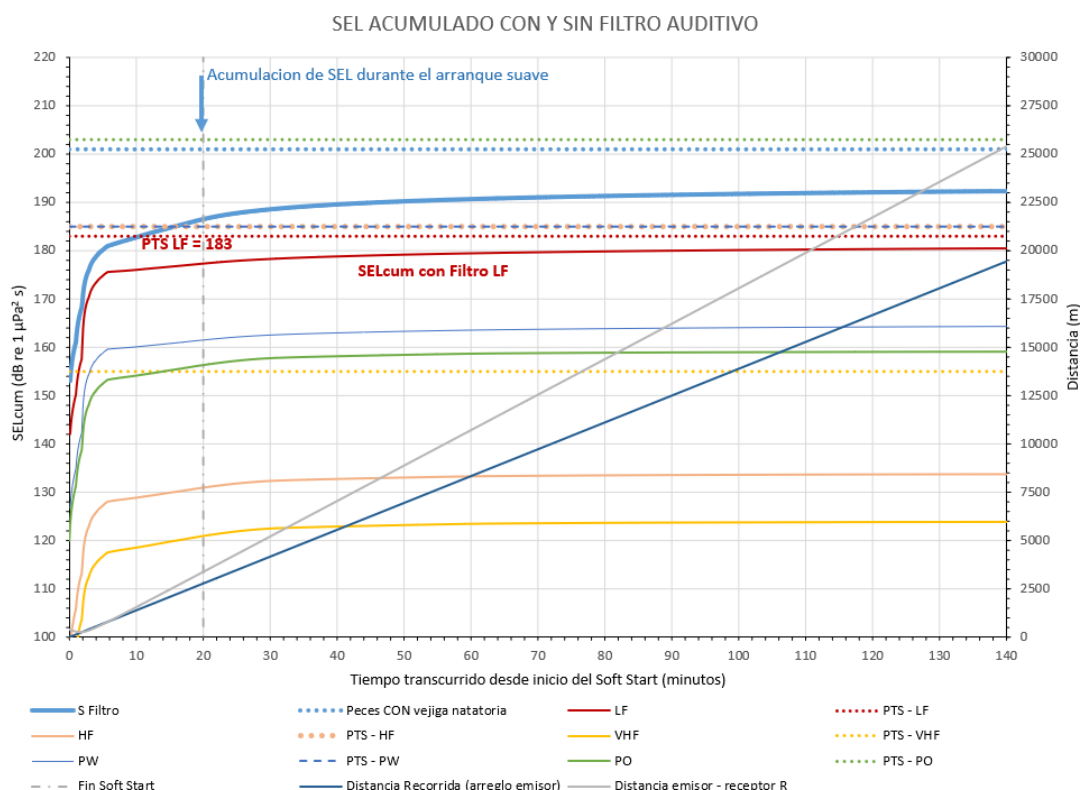


Figura 56. CAN_100-108. SEL acumulado. Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.



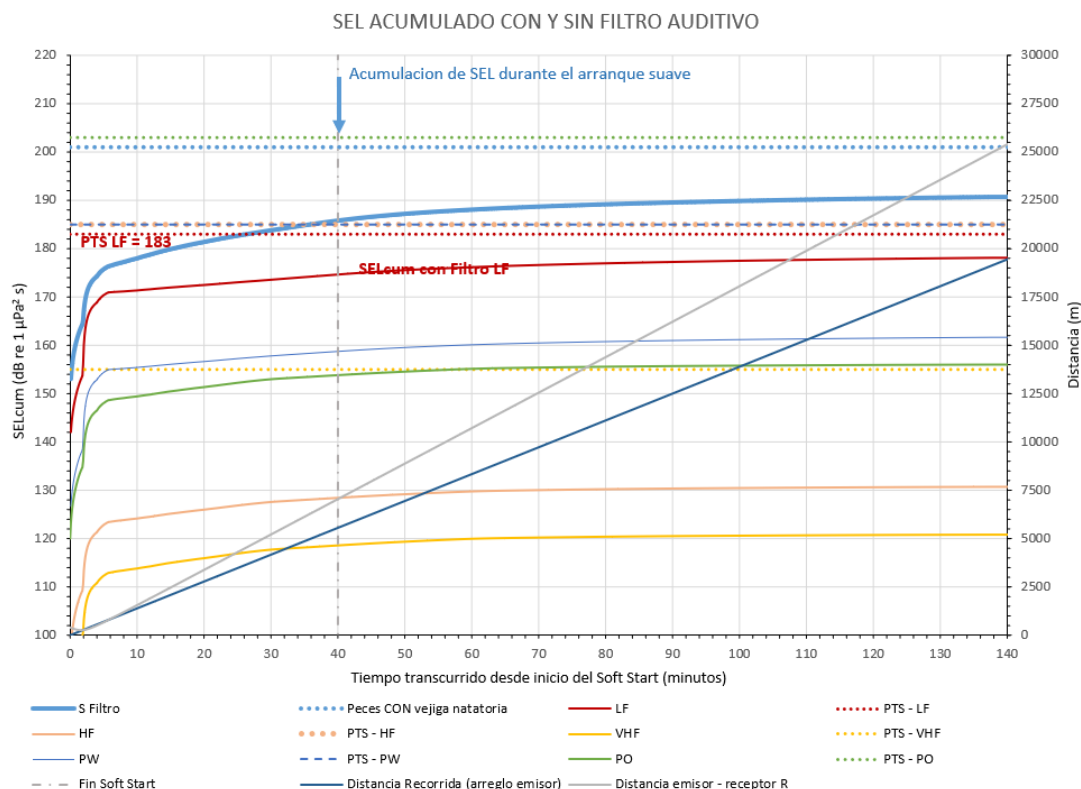


Figura 57. CAN_100-108. SEL acumulado. Soft Start 40 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

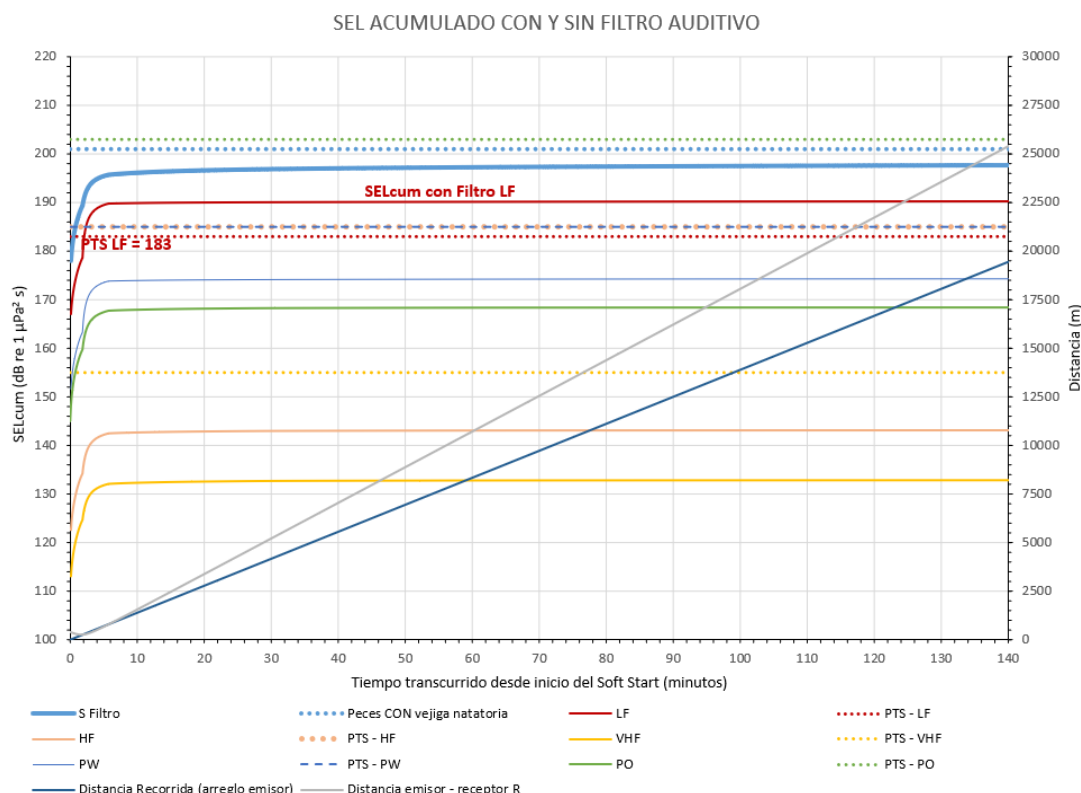


Figura 58. CAN_100-108. SEL acumulado. Hipótesis Sin Soft Start. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

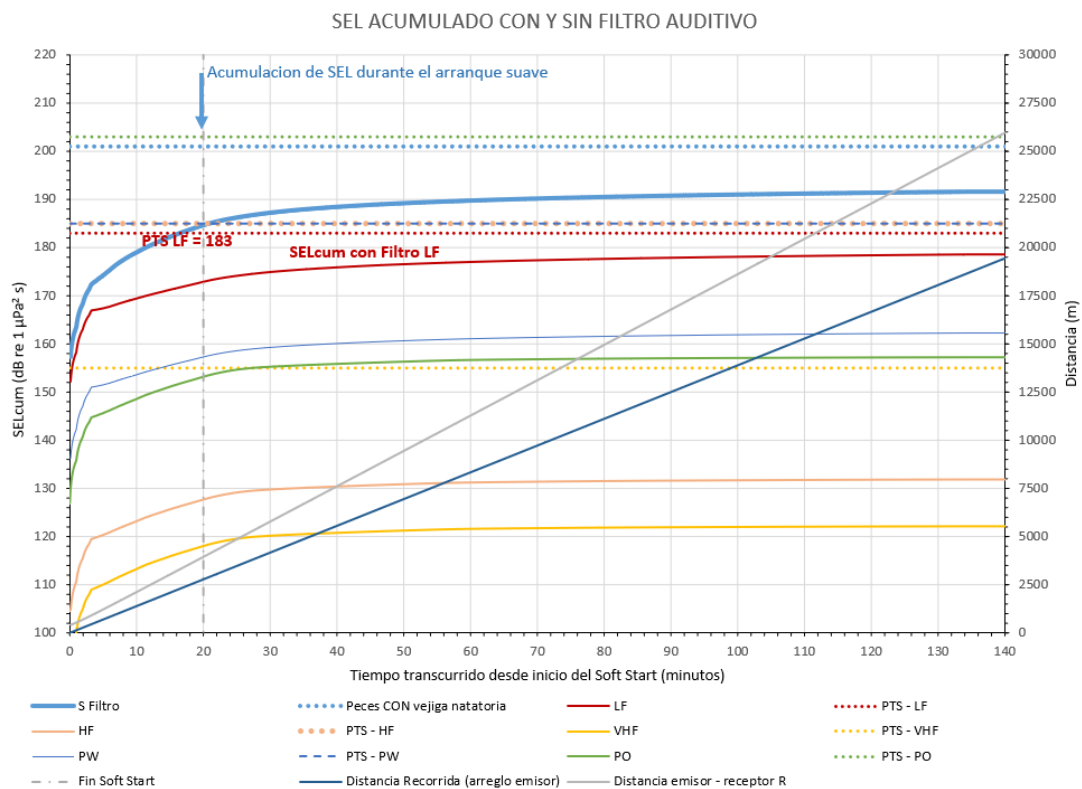


Figura 59. CAN_100-108. SEL acumulado. Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

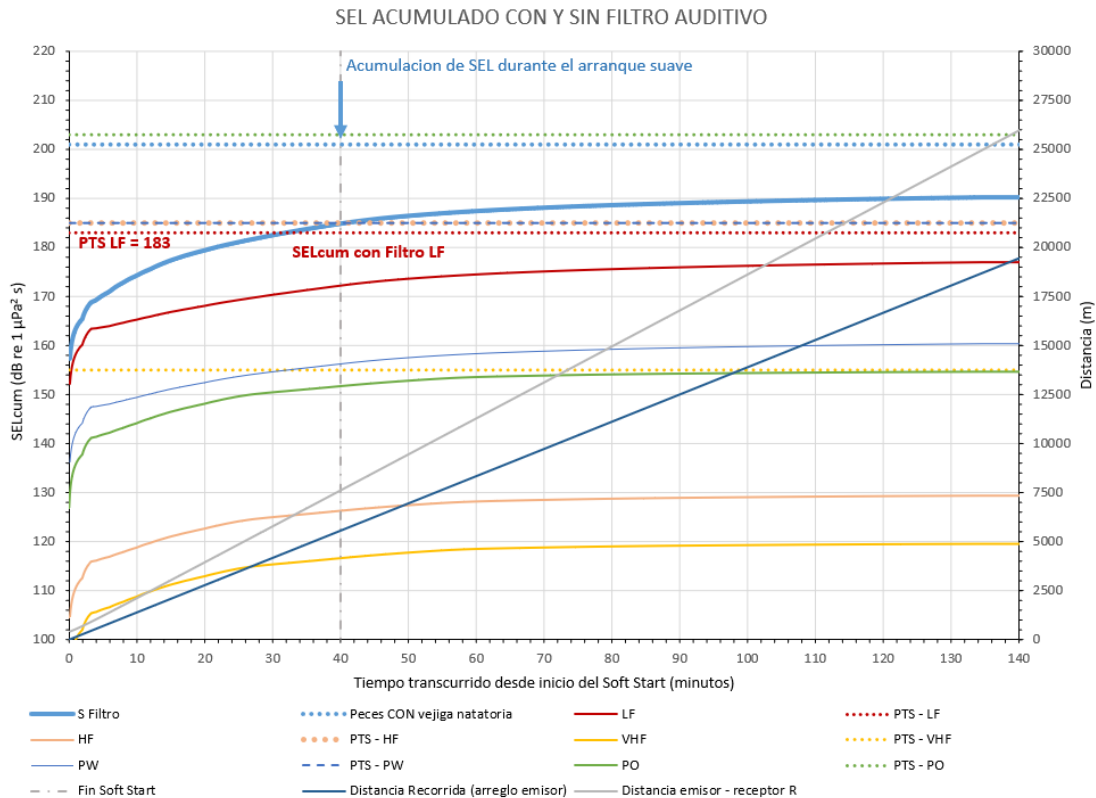


Figura 60. CAN_100-108. SEL acumulado. Soft Start 40 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

La Tabla 11 presenta los valores de SELcum obtenidos bajo diferentes hipótesis de punto inicial, trayectoria del receptor y duración del arranque suave. En todos los casos la velocidad del receptor se consideró constante e igual a 2 m/s.

Se puede apreciar que la reducción de la duración del arranque suave desde el máximo de 40 minutos al mínimo de 20 minutos suele implicar un incremento en el SELcum con filtro LF (el más restringente), aunque no se llega a superar el valor de PTS LF (183 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$). En función de ello, y como medida de seguridad, se considera apropiado que la duración del arranque suave sea, en lo posible, superior al mínimo establecido.

Por otra parte, la situación hipotética de no realizar arranque suave conllevaría la superación del PTS LF en más de 7 dB, lo cual ilustra la importancia que tiene esa medida, para poder alejar a los mamíferos marinos antes de iniciar la emisión a plena potencia.

Tabla 11. CAN_100-108 Valores de SELcum (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance.						
SELcum	192,3	180,5	133,7	123,9	164,3	159,1
Diferencia PTS	-8,7	-2,5	-51,3	-31,1	-20,7	-43,9
Soft Start 40 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance.						
SELcum	190,7	178,1	130,7	120,8	161,7	156,0
Diferencia PTS	-10,3	-4,9	-54,3	-34,2	-23,3	-47,0
Sin Soft Start. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance.						
SELcum	197,7	190,2	143,1	132,8	174,3	168,4
Diferencia PTS	-3,3	7,2	-41,9	-22,2	-10,7	-34,6
Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start.						
SELcum	191,6	178,6	131,9	122,1	162,3	157,2
Diferencia PTS	-9,4	-4,4	-53,1	-32,9	-22,7	-45,8
Soft Start 40 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start.						
SELcum	190,2	177,0	129,4	119,5	160,4	154,6
Diferencia PTS	-10,8	-6,0	-55,6	-35,5	-24,6	-48,4

En relación con los peces, se verifica que si se encontraran a 50 metros del arreglo en el momento de inicio del arranque suave, aún cuando no se desplazaran de ese sitio, el movimiento del emisor generaría un SELcum 9 dB más bajo que el umbral correspondiente a peces con vejiga natatoria (CON VN en la tabla).



En caso de encontrarse los peces en cercanías de la línea de relevamiento mientras que el mismo se esta desarrollando a plena potencia, se alcanzaría el umbral de mortalidad potencial 201 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ (sin filtro auditivo), en caso de hallarse a una distancia de 170 metros de la línea y permanecer estáticos mientras que el arreglo se acerca y aleja al punto de mínima distancia (situación poco probable puesto que los antecedentes indican que se produce comportamiento evasivo). Esta situación se ilustra en la **Figura 61** donde se ha simulado la acumulación del SEL para peces estáticos ubicados en el km 10 de la línea de relevamiento (se puede apreciar como la distancia R va disminuyendo y aumentando con el tiempo a medida que el arreglo se desplaza). El valor umbral para peces sin vejiga natatoria igual a 219 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ (sin filtro auditivo) no se alcanzaría aún cuando los peces se encontraran a la mínima distancia evaluada de 50 metros con respecto a la línea de relevamiento.

Cabe recordar además, que la energía emitida en cercanías del arreglo es menor que la que surge de los cálculos de campo lejano, que es la que se evalúa en este estudio. Estos resultados sugieren que una afectación de los peces que implique potencialmente la mortalidad de estos se produciría en un entorno muy localizado alrededor del arreglo.

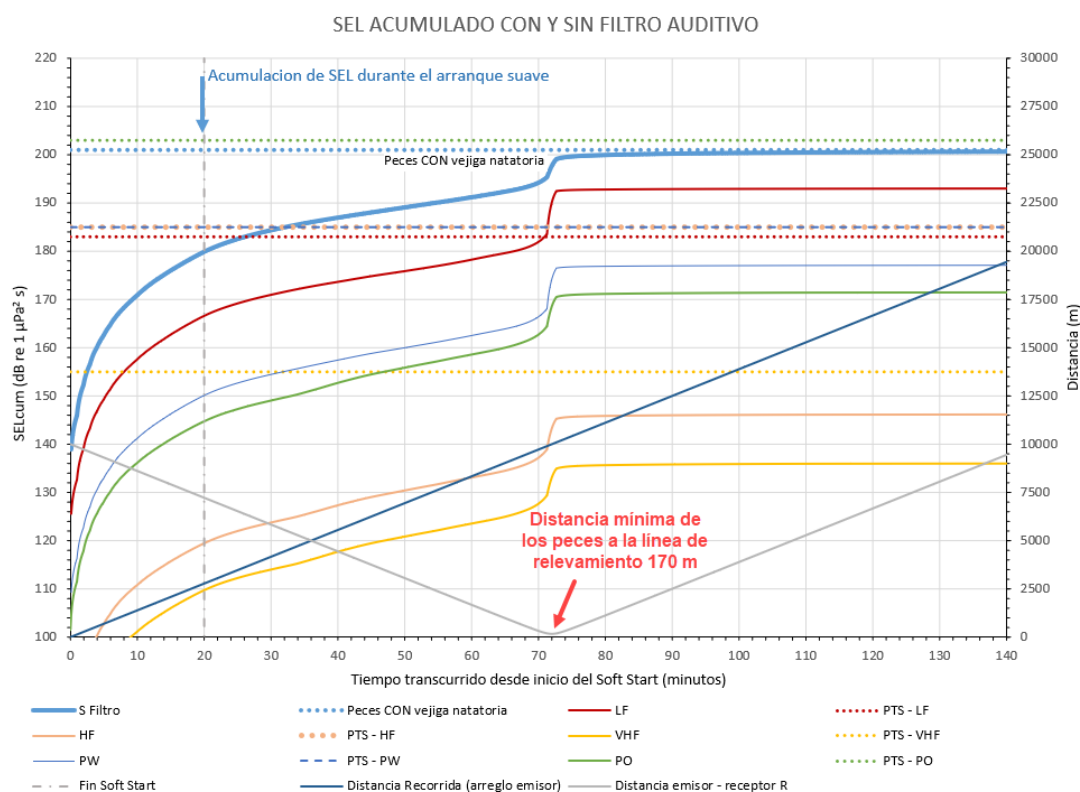


Figura 61. CAN_100-108. SEL acumulado igual al umbral de mortalidad potencial para peces con vejiga natatoria, considerando que se encuentran ubicados a 170 m de la línea de relevamiento.

Los mismos análisis de escenarios de escape de los mamíferos marinos fueron repetidos considerando los resultados de SEL para la combinación de suelos AB-GB (arena sobre gravas con parámetros base), en vez de la variante de fango sobre gravas F1-G3 utilizada para las evaluaciones precedentes.

Los resultados, en definitiva, son similares a los precedentes, lo cual era esperable dado que en los primeros kilómetros de distancia relativa entre emisor y receptor, las Pérdidas de Transmisión son muy similares para ambos tipos de suelo, los cuales influyen a distancias mayores, donde la acumulación de SEL es menos relevante. Se presentan los mismos en la Tabla 12.



Tabla 12. CAN_100-108 Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces. Sensibilidad al tipo de suelo (Arenas sobre Gravas)

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance.						
SELcum	190.3	176.6	133.2	123.8	161.7	158.7
Diferencia PTS	-10.7	-6.4	-51.8	-31.2	-23.3	-44.3
Soft Start 20 minutos, Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start,						
SELcum	189.9	175.8	132.7	123.4	160.9	158.2
Diferencia PTS	-11.1	-7.2	-52.3	-31.6	-24.1	-44.8

El mismo procedimiento de cálculo de acumulación de SEL se realizó para CAN_114, considerando en función de los resultados obtenidos para CAN_100-108, que el arranque suave se desarrolla con una duración mínima de 20 minutos, y que las trayectorias son las mismas que fueron evaluadas para el área anterior.

Los resultados se presentan en la **Figura 62** y la **Figura 63**, y en la Tabla 13 se pueden apreciar las diferencias entre los valores de SELcum alcanzados y los umbrales de PTS, que son sólo ligeramente menores que para CAN_100-108.

Tabla 13. CAN_114 Valores de SELcum (dB re 1 μPa^2 s) comparados con los umbrales de PTS para mamíferos y límites para peces.

Filtro	Sin Filtro	LF	HF	VHF	PW	PO
Umbrales de comparación	Peces SIN VN	PTS - LF	PTS - HF	PTS - VHF	PTS - PW	PTS - PO
	219	183	185	155	185	203
	Peces CON VN	TTS - LF	TTS - HF	TTS - VHF	TTS - PW	TTS - PO
	201	168	170	140	170	188
Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance.						
SELcum	192,4	180,7	134,1	124,3	164,6	159,5
Diferencia PTS	-8,6	-2,3	-50,9	-30,7	-20,4	-43,5
Soft Start 20 minutos, Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start,						
SELcum	191,7	178,9	132,6	122,9	162,8	158,0
Diferencia PTS	-9,3	-4,1	-52,4	-32,1	-22,2	-45,0



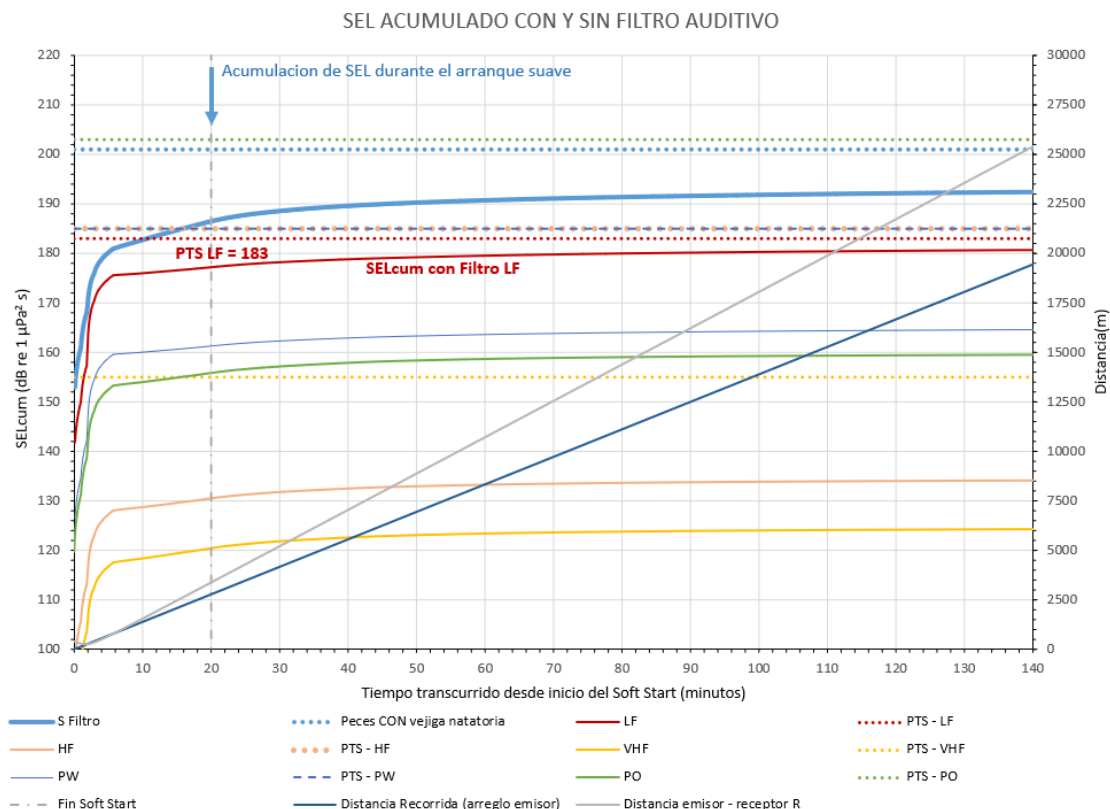


Figura 62. CAN_114. SEL acumulado. Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor en la línea de avance. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

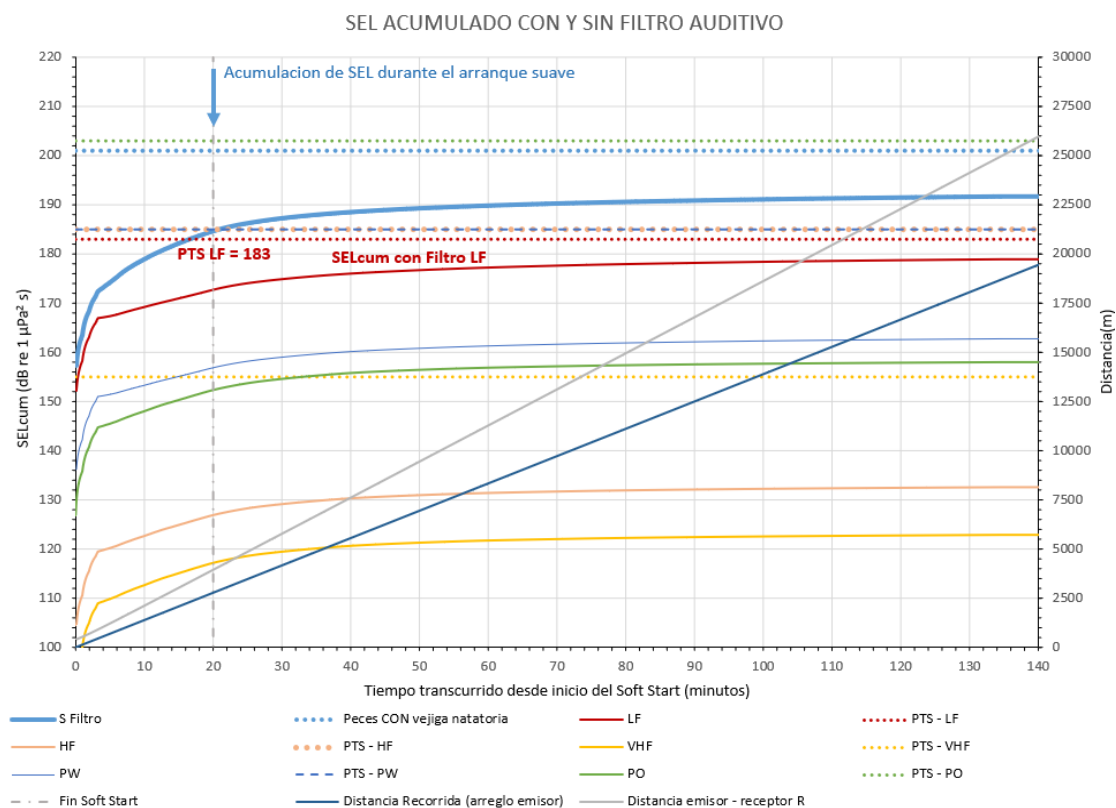


Figura 63. CAN_114. SEL acumulado. Soft Start 20 minutos. Posición inicial del receptor a 400 m del emisor, perpendicular a la línea de avance en el punto de arranque del Soft Start. Azimut movimiento del receptor 90° a 2 m/s.

9 CONCLUSIONES

Las distancias de exclusión obtenidas mediante el empleo del criterio de métrica dual propuesto por Southall (2019) resultan de 400 metros tanto para las áreas CAN_100-108 como para CAN_114.

Esta distancia surge del criterio de SPL_{peak} sin filtrar, siendo limitante el valor de PTS – VHF (grupo de cetáceos de frecuencias auditivas muy altas).

Cabe destacar que el valor obtenido ha sido alcanzado seleccionando las condiciones de profundidad y características del medio más conservativas en cuanto a las Pérdidas por Transmisión del sonido, pero su magnitud es prácticamente independiente de las condiciones del lecho marino adoptadas. Tampoco se modifican significativamente las Pérdidas por Transmisión según las características de los perfiles oceanográficos empleados (velocidad del sonido y densidad del agua mensuales), por lo cual se considera que puede considerarse flexibilidad en cuanto a los meses de realización de los relevamientos, siempre que no se realicen en período invernal, cuando las condiciones cambian sustancialmente.

El criterio de SEL_{cum} se aplicó para verificar si la distancia de exclusión antes obtenida debía ser ampliada por superación de los umbrales de PTS para alguno de los grupos auditivos.

Para ello, se consideró una duración del procedimiento de arranque suave mínima de 20 minutos, verificándose que si la misma se incrementa es esperable que la acumulación de SEL_{cum} sea inferior.

La situación más restrictiva de SEL_{cum} se genera para los cetáceos de frecuencias auditivas bajas (PTS – LF), no obstante lo cual, planteando escenarios de trayectorias de escape razonables conforme a los antecedentes bibliográficos, se obtienen valores de SEL_{cum} inferiores al umbral de PTS, ratificándose así que la distancia de exclusión del criterio SPL_{peak} es válida.

Sin embargo, conforme a las recomendaciones usuales (JNCC, 2017), se considera conveniente ampliar esta distancia a los 500 metros, que son un estándar habitual empleado en la industria.

Con respecto a los peces y considerando la métrica del SPL, las distancias en que se superan el umbral de mortalidad potencial son de unos 200 m para los peces con vejiga natatoria y 100 m para los peces sin vejiga natatoria (tablas 9 y 10).

Se recuerda que mediante modelación se analizaron distancias a partir de los 50 m desde el arreglo, puesto que muy cerca del arreglo el valor del SEL y SPL son inferiores a los estimados a partir del campo lejano, y el cálculo de la propagación de algunas frecuencias es poco preciso.

En relación con la métrica del SEL_{cum}, los peces con vejiga natatoria pueden encontrarse a 50 m del arreglo cuando comienza el arranque suave, y si quedaran estáticos en ese lugar a medida que el buque se aleja, no se superaría el umbral de mortalidad potencial. Si estuviesen justo cerca de una línea de prospección y no se movieran cuando pasa el arreglo emitiendo a máxima potencia (lo cual es poco probable que ocurra pues se han documentado comportamientos evasivos), se superaría el umbral de mortalidad potencial si la distancia al arreglo fuese inferior a 170 m.

En cambio, los peces sin vejiga natatoria pueden encontrarse a 50 m del arreglo sin superar el umbral de mortalidad potencial para SEL_{cum}.

Si bien no se requiere ni es factible la implementación de medidas de mitigación con respecto a los peces, las puede apreciar que solamente serían afectados aquellos que se encuentren en un entorno muy cercano al arreglo, del cual muy probablemente se alejen tanto durante el proceso de arranque suave, como durante la prospección de cada línea si el arreglo se acercara a la ubicación de los mismos.



10 BIBLIOGRAFÍA

Atlas de sensibilidad ambiental de la costa y el mar argentino (2008) en Boltovskoy, D. (ed.). [En línea] buenos aires, disponible en: <http://atlas.ambiente.gov.ar/>.

Caldwell, J. and W. Dragoset (2000). A brief overview of seismic air-gun arrays. The Leading Edge 2000.

Gordon Jonathan C.D., Douglas Gillespie, John Potter, Alexandros Frantzis, Mark P. Simmonds and Rene Swift, "The Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals", 2003.

Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables. IBAMA. (2018). Guía para el Monitoreo de la Fauna Marina en los Estudios Sísmicos Marinos. Ministerio de Medio Ambiente del Brasil.

IOC, SCOR y IAPSO (2010). The International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp. http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf

International Association of Oil&Gas Producers (IOGP). International Association of Geophysical Contractors (IAGC). 2017. Recommended monitoring and mitigation measures for cetaceans during marine seismic survey geophysical operations. Report 579. <https://www.iagc.org/uploads/4/5/0/7/45074397/579.pdf>

Jensen F., Kuperman W., Porter M., and Schmidt H. (1994). Computational Ocean Acoustics. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing, New York.

Joint Nature Conservation Committee. August 2017. JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys. <https://data.jncc.gov.uk/data/e2a46de5-43d4-43f0-b296-c62134397ce4/jncc-guidelines-seismicsurvey-aug2017-web.pdf>

Kuperman W.A. and Roux P. (2007). Underwater acoustics. Marine Physical laboratory, Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego. Springer Handbook of Acoustics, ISBN 978-0-387-30446-5. Springer-Verlag New York, 2007, p. 149. DOI: 10.1007/978-0-387-30425-0_5. https://www.researchgate.net/publication/234472513_Underwater_Acoustics/download

Lawson, J.W., Malme C.I., Richardson W.J. (2001). Assesment of Noise Issues relevant to Marine Mammals Near the Bp Clair Development. Rep. By Lgl Ltd., Envrion. Res. Assoc. King City, Ont. Canada, and Eng. and Sci. Services, Hingham, Ma, U.S.A., For Aurora Environmental Ltd., Stromness Orkney. Lgl Rep. Ta2565-1.

Leroy C. (2008) A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. The Journal of the Acoustical Society of America 124, 2774

McCauley R., Fewtrell J., Duncan A., Jenner C., Jenner M., Penrose J., Prince R., Adhitya A., Murdoch J., McCabe K. (2000). Marine seismic surveys: analysis and propagation of air-gun signals; and effects of air-gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Centre for Marine Science and Technology, Project Cmst 163, Report R99-15, Curtin University of Technology. Western Australia.

McDougall, T. J. y P. M. Barker (mayo 2011 - última actualización julio 2017 - versión 3.06.3). Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Tool - v3.06.3). http://www.teos-10.org/pubs/Getting_Started.pdf



McDougall, T. J. (s/f). The International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010, Introductory lecture slides. University of New South Wales, Ocean Physics, School of Mathematics and Statistics. Disponible en www.TEOS-10.org

National Marine Fisheries Service. 2016. Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p.

Nedwell J R, Needham K, Turnpenny A W H, Thompson D (1999) "Measurement of Sound During a 3D Seismic Survey in Blocks 14/14a of the North Sea". Subacoustech Report Reference: 356r0108, February 1999.

Orúe-Echevarría, D.; Pelegrí, J.L.; Alonso-González, I.J.; Benítez-Barrios, V.M.; De La Fuente, P.; Emelianov, M.; Gasser, M.; Herrero, C.; Isern-Fontanet, J.; Peña-Izquierdo, J.; Ramírez-Garrido, S.; Rosell-Fieschi, M.; Salvador, J.; Saraceno, M.; Valla, D.; Vidal, M. (2019). "Dataset on the TIC-MOC cruise onboard the R/V Hespérides, March 2015, Brazil-Malvinas Confluence". Data in Brief. 22:185-194.

Pawlowicz, R. (octubre 2010, última actualización abril 2013 - v8). What every oceanographer needs to know about TEOS-10 (The TEOS-10 Primer) - v8. http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Primer.pdf

Piola, A. y R. P. Matano (2017). Brazil and Falklands (Malvinas) Currents. En: Ocean Currents: Atlantic Western Boundary - Brazil Current / Falkland (Malvinas) Current, pp 340-349.

Popper, A., Hawkins, A., Fay, R., Mann, D., Bartol, S., Carlson, T., Coombs, S., Ellison, W., Gentry, R., Halvorsen, M., Løkkeborg, S., Rogers, P., Southall, B., Zeddies, D., y Tavalga, W. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: A technical report prepared by ansi-accredited standards committee s3/sc1 and registered with ANSI. 978-3-319-06658-5. springer international publishing.

Porter M.B. and Bucker H.P. (1987) Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic Fields. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349-1359.

Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, Jr., C. R., , Kastak, D., et al. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. Aquatic Mammals, 33: 411–521.

Southall B.L., Finneran J. J., Reichmuth C., Nachtigall P. E., Ketten D. R., Bowles A. E., Ellison W. T., Nowacek D. P. and Tyack P. K.. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations For Residual Hearing Effects. Aquatic Mammals .45(2):125-232, Doi:10.1578/Am.45.2.2019.125

Violante R., Costa I., Cavallotto J., Paterlini C., Marcolini S. y Bozzano G. (2014). Rasgos morfosedimentarios, procesos y evolución de la plataforma continental argentina desde el último máximo glacial. Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Oceanografía, División Geología y Geofísica Marina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 71 (2): 292 – 310

Urick, Robert J. (1983). Principles of Underwater Sound, Third Edition. McGraw-Hill Book Company, p. 111.

Wang, L., Heaney, K., Pangerc, T., Theobald, P., Robinson, S., and Ainslie, M. (2014). Review of underwater acoustic propagation models. National Physical Laboratory, Teddington, UK