



## ÍNDICE

<b>6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES.</b>	<b>1</b>
6.1. INTRODUCCIÓN	1
6.2. SOLUCIONES PROPUESTAS	1
6.2.1. Cuneta perimetral desde la bifurcación	1
6.2.2. Canalización de cada quebrada mediante tubería	4
6.2.2.1. Características del material propuesto	5
6.2.2.2. Diseño hidráulico	6
6.2.3. Canalización de todo el caudal de drenaje por una de las quebradas	7
6.3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	8



## 6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES.

### 6.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez realizado el estudio hidrológico y el estudio hidráulico de la situación actual estamos en disposición para analizar diferentes soluciones para la eliminación de la afección de las quebradas al futuro emplazamiento del parque eólico de Cerro Tigre en la región de Antofagasta, Chile.

Las distintas soluciones que a continuación se exponen deberán proporcionar medidas que, garanticen la exigencia definida por el cliente a quien va dirigido el proyecto, es decir, eliminar por completo cualquier afección de los cauces dentro de la parcela que albergará el futuro parque eólico.

Los sistemas de drenaje de la superficie del parque eólico deberán proporcionar un medio para que el agua superficial, que escurre por las quebradas, en forma permanente o eventual, pueda ser evacuada sin causar daños a las instalaciones que en un futuro se dispondrán.

La topografía de la zona así como los perfiles longitudinales de las quebradas serán puntos clave para el diseño y selección de las diferentes alternativas.

### 6.2. SOLUCIONES PROPUESTAS.

#### 6.2.1. Cuneta perimetral desde la bifurcación.

Como primera de las soluciones se propone la ejecución de una cuneta de sección triangular que desvíe el caudal circulante. Dada la topografía del terreno, resulta inviable realizar una cuneta por cada quebrada que recoja el flujo de cada una de ellas y lo dirija por el perímetro de la superficie del parque eólico.

Por este motivo, se propone la realización de una única cuneta con inicio en la bifurcación de las quebradas y que, siguiendo las curvas de nivel, sea capaz de drenar el caudal para la avenida de 100 años tal y como se indica en el Manual de carreteras capítulo 3700 (diseño del drenaje, saneamiento mecánica e hidráulica fluvial) de la Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas Chile.

Tal y como se indica en dicho manual en el numeral 3.704.2, la pendiente longitudinal mínima para cunetas revestidas será del 0,12% y de 0,25% en aquellas sin revestir. En términos de la pendiente transversal, las cunetas de solera de 0,50m de ancho tendrán una pendiente transversal máxima de 30% hacia la solera, para aprovechar en mejor forma la capacidad de la cuneta. Para cunetas con ancho superior a 0,50m, la pendiente transversal no será menor que 8%.

La capacidad hidráulica de las cunetas triangulares se puede calcular empleando la ecuación de Manning, expresada de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \Omega \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

donde:

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/s).

n= Coeficiente de Manning.

Ω= Área de la sección (m<sup>2</sup>).

R= Radio hidráulico (m).

i= Pendiente longitudinal (m/m).

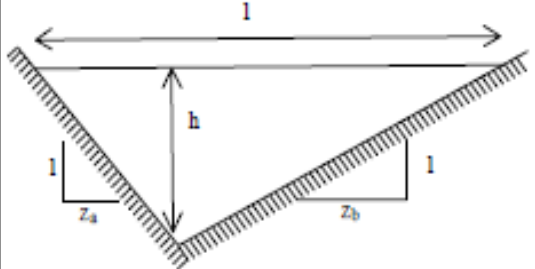
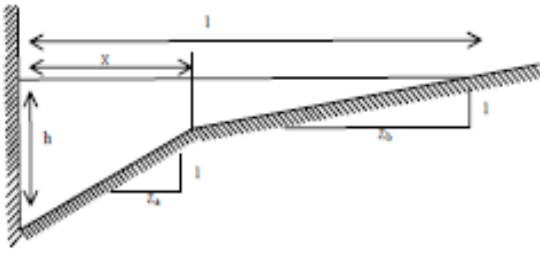
	Tipo de Cuneta o Canal	
		
Ancho Superficial (l)	$(z_a + z_b) \cdot h$	$x + z_b \cdot \left( h - \frac{x}{z_a} \right)$
Area (A)	$\frac{(z_a + z_b) \cdot h^2}{2}$	$x \cdot h + \frac{z_b \cdot h^2}{2} + \frac{x^2}{2 \cdot z_a} \cdot \left( \frac{z_b}{z_a} - \frac{2 \cdot z_b \cdot h}{x} - 1 \right)$
Perímetro Mojado (P)	$(\sqrt{1 + z_a^2} + \sqrt{1 + z_b^2}) \cdot h$	$h + \sqrt{x^2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{z_a^2} \right)} + \sqrt{z_b^2 + 1} \cdot \left( h - \frac{x}{z_a} \right)$
Radio Hidráulico (R)	$\frac{(z_a + z_b) \cdot h}{2 \cdot (\sqrt{1 + z_a^2} + \sqrt{1 + z_b^2})}$	$\frac{x \cdot h + \frac{z_b \cdot h^2}{2} + \frac{x^2}{2 \cdot z_a} \cdot \left( \frac{z_b}{z_a} - \frac{2 \cdot z_b \cdot h}{x} - 1 \right)}{h + \sqrt{x^2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{z_a^2} \right)} + \sqrt{z_b^2 + 1} \cdot \left( h - \frac{x}{z_a} \right)}$

Figura 1. Secciones tipo cuneta triangular.

Fuente: Manual de carreteras. Volumen N°3 (Ministerio de Obras Públicas).

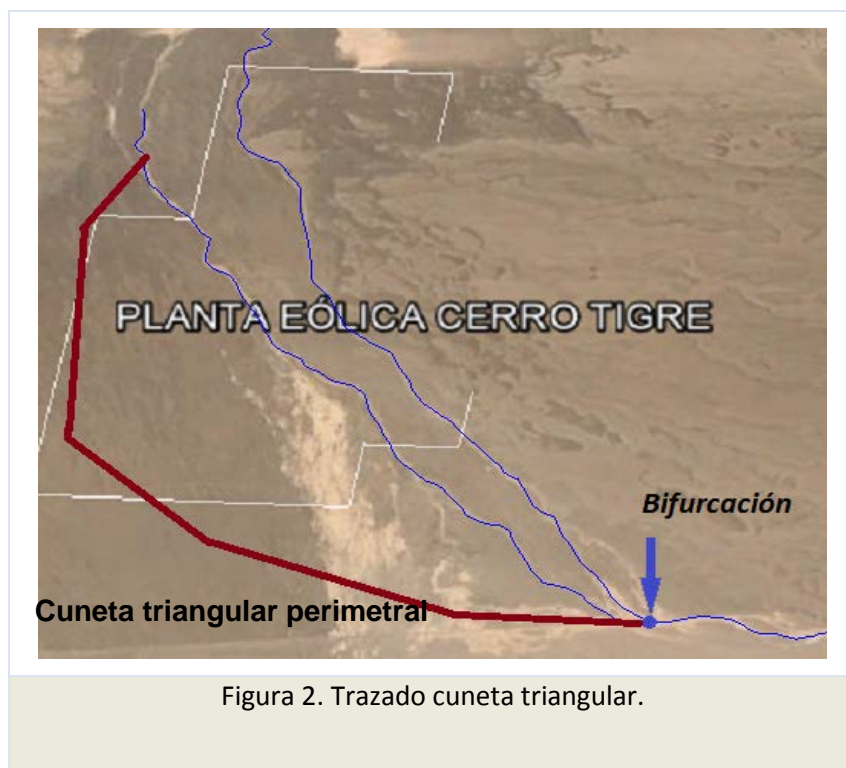


Figura 2. Trazado cuneta triangular.

Tal y como se aprecia en la figura anterior, la cuneta discurriría por la zona sur del parque, interceptando las dos quebradas en la bifurcación y desaguando todo el caudal recogido aguas abajo del parque.

Dados los pequeños caudales que circularan por la cuneta, así como su gran longitud, se propone la realización de una cuneta de tierras realizada mediante la maquinaria adecuada.

La sección de la cuneta y las dimensiones de la misma se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Cálculos dimensión cuneta.

CUNETA DE SECCIÓN TRIANGULAR	
n	0.003
A	2.7 m <sup>2</sup> .
R	0.425
i	0.025
Za	2
Zb	4
h	0.9

Estos cálculos han sido realizados con la formulación que nos proporciona la normativa y que se exponen en la figura 1.

Al tratarse de cuneta de tierras la pendiente longitudinal ( $i$ ) elegida es de 0.025%, el coeficiente de rugosidad ( $n$ ) se ha determinado como 0.025 dado que se trata de terreno natural sin vegetación y compactado.

El trazado de la cuneta deberá ser por la zona sur del parque, puesto que la disposición de las curvas de nivel favorece la pendiente positiva reduciendo las zonas de desmonte y terraplén.

Con todo ello, la cuneta tendrá una capacidad máxima de 8 m<sup>3</sup>/s.

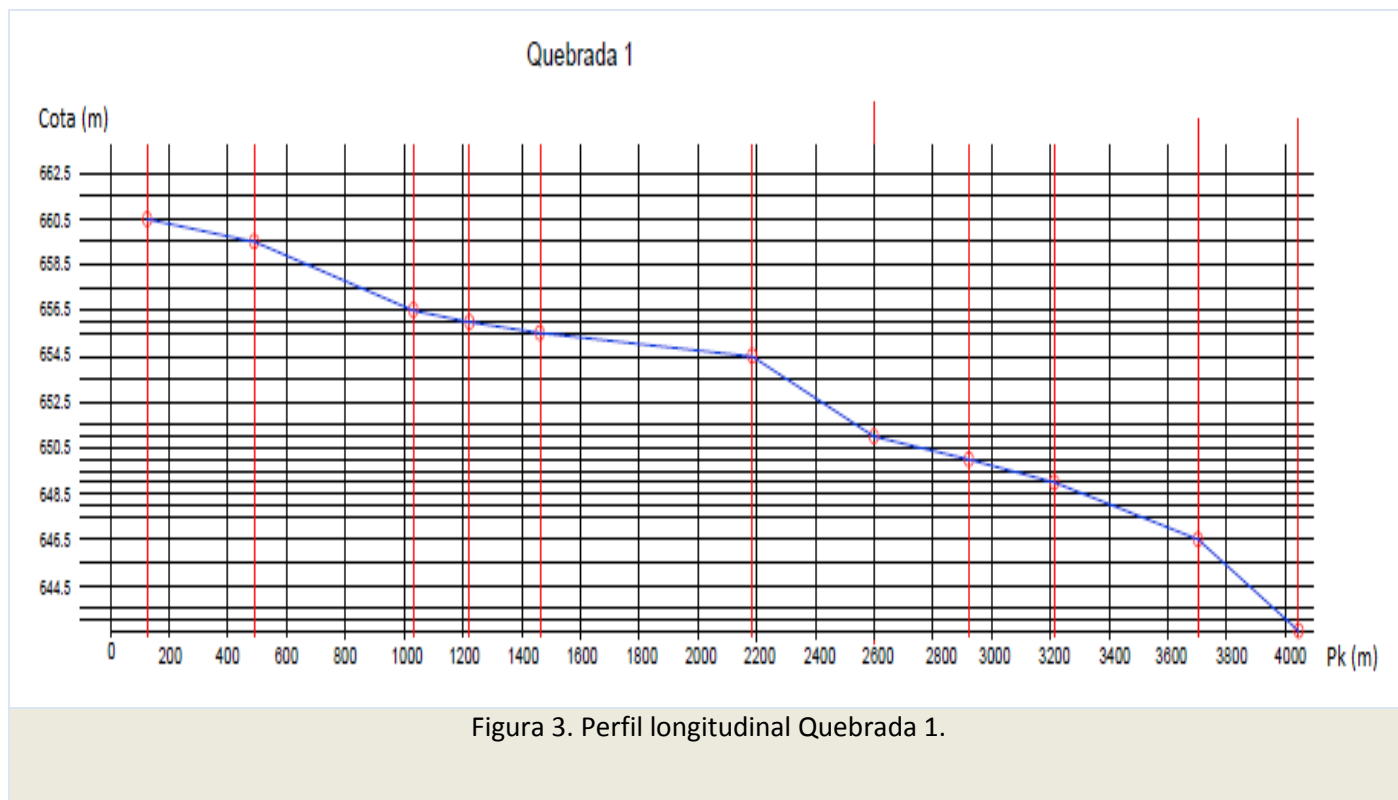
#### 6.2.2. Canalización de cada quebrada mediante tubería.

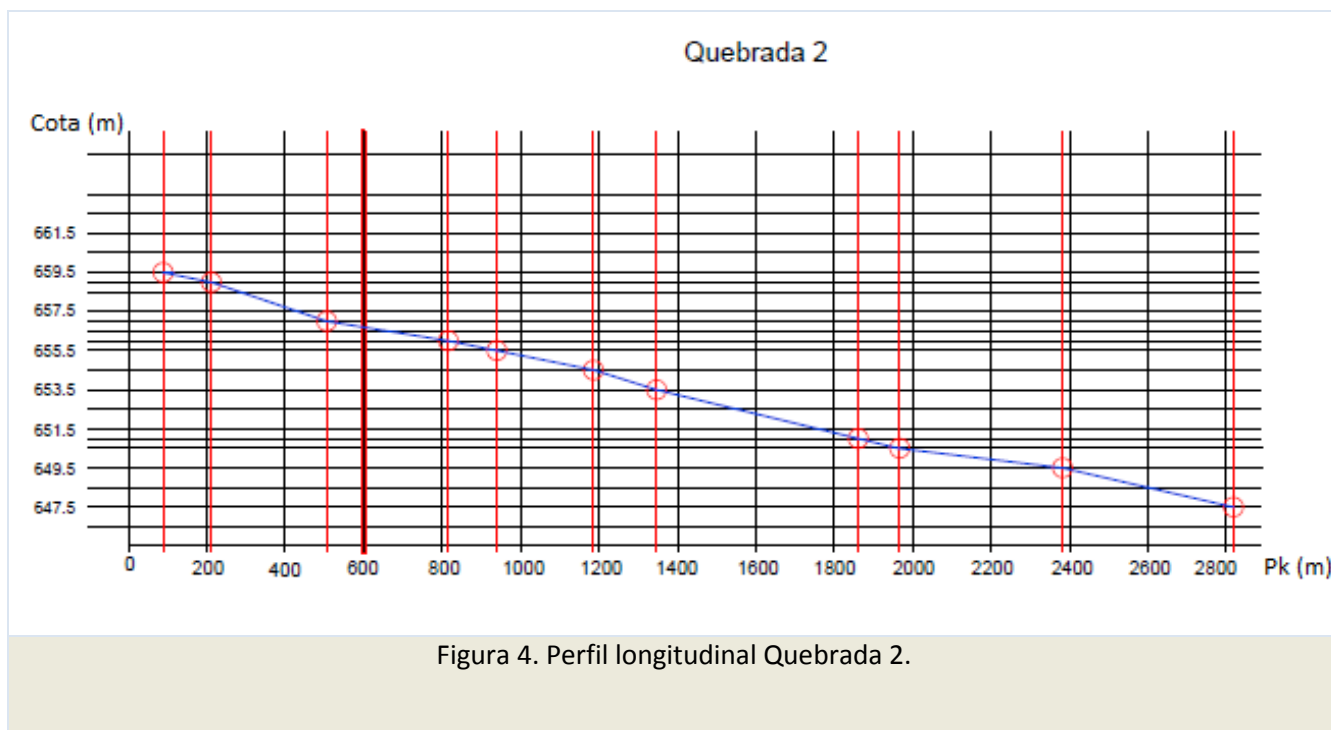
Canalizar mediante tubería de PEAD (polietileno de alta densidad) ambas quebradas es la segunda solución que se propone

La adecuada elección de la ubicación, alineación y pendiente de la entubación es importante ya que de ello depende su comportamiento hidráulico y los costes de construcción y mantenimiento.

Es por ello por lo que se propone ubicar el drenaje mediante tubería siguiendo la traza de cada quebrada y su pendiente natural ya que existe un balance de factores, tales como, la pendiente del cauce, la velocidad del agua y su capacidad para transportar materiales en suspensión.

Para el diseño de las tuberías se analiza en primer lugar los perfiles longitudinales de las quebradas, analizando los tramos con pendiente constante, con el fin de reducir el número de tramos de tubería y de quiebros.





El Manual de carreteras capítulo 3700 (diseño del drenaje, saneamiento mecánica e hidráulica fluvial, de la Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas Chile), propone que en zonas de amplios valles donde los cordones montañosos tienen escasa vegetación, las tormentas intensas producen un importante arrastre de sólidos mezclados con vegetación seca, los que tienden a obstruir las obras de drenaje, especialmente si estas disminuyen la velocidad del flujo.

Esta situación puede subsanarse aumentando la velocidad del flujo, pese a que conlleve al revestimiento de la entrada y de la salida de la obra. Además, se propondrá la ubicación a la entrada de la obra de un desarenador.

#### 6.2.2.1. Características del material propuesto.

El material elegido para esta tipología de drenaje es el polietileno de alta densidad (PEAD). La elección de este material se debe a su flexibilidad, fácil colocación en obra, menor coste de adquisición, flexibilidad del material, resistente a los agentes químicos y a la abrasión. Este tipo de material también está protegida contra la degradación causada por los rayos ultravioleta y el calor, por lo que tiene una larga duración en instalaciones al aire libre.

La tubería de PAD tiene una resistencia química sobresaliente. La mayoría de los agentes químicos, ácidos, sales y suelos son calientes, no atacan a la tubería de polietileno de alta densidad, no le causan degradación. No se oxida, pudre o corroe. No permite desarrollo de bacterias o algas.

La tubería de polietileno de alta densidad, tiene una superficie interior sumamente lisa. Mantiene excelentes propiedades de flujo durante toda su vida de servicio debido a su gran resistencia a la abrasión y agentes químicos. Gracias a sus paredes lisas y con características no mojantes, se cuenta con una capacidad de caudal mayor y menor pérdida por fricción. Se empleará como factor de rugosidad en la fórmula de Manning "n" de 0.011.

Debido a la facilidad de manejo de la tubería de polietileno de alta densidad, su colocación será sencilla y rápida.

Este tipo de tuberías se pueden doblar en frío a un radio mínimos de 20-40 veces el diámetro del tubo a medida que se va instalando, lo que elimina la necesidad de usar codos en ángulos poco pronunciados.

Otro factor importante ante la elección del material de la tubería a instalarse es, la disponibilidad del mismo cerca de la ubicación del parque eólico de Cerro Tigre. Este hecho condiciona de forma importante la elección dado que se dispone de una fábrica de suministro de tuberías de PEAD a cuarenta kilómetros de la localización de la parcela. Esto abaratará los costes de transporte y suministro así como el transporte de la maquinaria a emplear para su colocación.

Todas estas características hacen de este material el idóneo para la solución de drenaje de la parcela.

#### 6.2.2.2. Diseño hidráulico.

##### Caudal de diseño

El caudal de diseño viene determinado por los resultados obtenidos en Anejo IV Estudio Hidrológico en cual se muestran los caudales punta para los distintos periodos de retorno. Ahora bien, en el Estudio Hidráulico (Anejo V) se definen los caudales que circularán por cada una de las quebradas, siendo el reparto de caudales más desfavorable el obtenido para un periodo de retorno de 100 años. Es por esto que se realizarán los cálculos pertinentes para estos caudales que se recogen en la tabla siguiente.

Tabla 2 Caudales de diseño.

QUEBRADA 1	QUEBARADA 2
3.8 m³/s	3.5 m³/s

##### Elección del diámetro.

Los tubos que servirán de drenaje a la parcela del parque eólico deberán tener un diámetro tal, que se asegure de que no entre en carga. El Manual de carreteras capítulo 3.703.2 (diseño del drenaje, saneamiento mecánica e hidráulica fluvial, de la Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas Chile) exige que al menos el diámetro del tubo para obras de drenaje superior a 10 m de longitud deberá de ser de 1m.

Ahora bien para garantizar esta elección se procede a calcular mediante la siguiente expresión el diámetro apropiado para nuestra obra.

$$D_d = 1,548 \left( \frac{n \cdot Q_d}{\sqrt{i}} \right)^{3/8}$$

Donde:

Dd: diámetro de diseño de la tubería (m)

n: rugosidad.

Qd: caudal de diseño (m³/s)

i: pendiente longitudinal (m/m).

De este modo se obtiene un diámetro de diseño de 1.27m, el cual aproximaremos a 1.3m quedándonos del lado de la seguridad y en este caso garantizando lo indicado en la normativa chilena.

La finalidad del drenaje es eliminar cualquier circulación de caudal por cauce natural dentro del emplazamiento del parque eólico. Para esta solución se propone colocar una tubería por cada quebrada de modo que se drenen los caudales fuera de la parcela, es por ello por lo que el caudal de diseño se admite el de la quebrada uno es decir un caudal de 3.8 m³/s.

La pendiente longitudinal se adaptará en la medida de lo posible a la pendiente natural de las quebradas, es decir, se distribuirán tramos en función de la pendiente longitudinal con la finalidad de optimizar la longitud de la misma.

#### 6.2.3. Canalización de todo el caudal de drenaje por una de las quebradas.

Como última solución se plantea la canalización de todo el caudal por una de las dos quebradas mediante tubería de polietileno de alta densidad.

Las características y ventajas que hacen de este material el idóneo se explicaron anteriormente.

Esta solución implica el nuevo dimensionamiento del diámetro de la tubería puesto que todo el drenaje se realizaría por una de las quebradas. Para ello, se comunicarían ambas quebradas de modo que, una de ellas ceda todo el caudal que recoge a la otra y de este modo, únicamente habría que disponer una tubería de drenaje a lo largo del parque eólico.

El criterio de selección de la quebrada por la cual se dispondrá el drenaje viene definido por la longitud de la misma, puesto que con ello se obtiene un mayor ahorro en los costes y tiempos de ejecución así como un menor número de tramos. Debido a esto, se selecciona la quebrada número dos dado que posee una longitud de 2800m frente a los 4000m de la quebrada número uno.

#### Caudal de diseño.

El caudal de diseño viene definido por el estudio hidrológico del Anejo IV, a diferencia de la solución propuesta anteriormente, no será necesario realizar reparto de caudales puesto que la conducción principal deberá recoger la totalidad del caudal para la avenida de periodo de retorno de 100años.

Este caudal será de 7.3 m³/s.

#### Elección del diámetro.

Los tubos que servirán de drenaje a la parcela del parque eólico deberán tener un diámetro tal, que se asegure de que no entre en carga. El Manual de carreteras capítulo 3.703.2 (diseño del drenaje, saneamiento mecánica e hidráulica fluvial, de la Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas Chile) exige que al menos el diámetro del tubo para obras de drenaje superior a 10 m de longitud deberá de ser de 1m.

Ahora bien para garantizar esta elección se procede a calcular mediante la siguiente expresión el diámetro apropiado para nuestra obra.

$$D_d = 1,548 \left( \frac{n \cdot Q_d}{\sqrt{i}} \right)^{3/8}$$

Donde:

Dd: diámetro de diseño de la tubería (m)

n: rugosidad.

Qd: caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

i: pendiente longitudinal (m/m).

De este modo se obtiene un diámetro de diseño de 1.62m, el cual aproximaremos a 1.7m asegurando que la tubería no entre en carga aún cuando por ella circulen caudales para la avenida de 100 años de periodo de retorno.

Al igual que en la solución descrita anteriormente, la pendiente se adaptará a la pendiente natural del cauce, intentando en la medida de lo posible, reducir el número de tramos a ejecutar en función de los tramos con pendiente constante que posea la quebrada.

### 6.3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.

Dentro de las tres soluciones que se proponen en el apartado anterior, deberemos escoger una que bajo criterios técnicos y económicos sea la más aventajada y por lo tanto la solución escogida.

En primer lugar descartaremos la primera de las soluciones que consiste en la ejecución de una cuneta de sección triangular desde la bifurcación de las quebradas hasta fuera de los límites del parque eólico. Tal y como se muestra en la figura 2, el trazado de la cuneta discurre por la zona sur de la parcela donde las curvas de nivel favorecen la pendiente positiva, pero pese a ello, existen zonas donde la pendiente llega a ser negativa y el volumen de excavación será de mayor envergadura. La longitud de la cuneta aproximadamente sería de 7600 metros, esta longitud hace que el la ejecución sea más costosa, que los volúmenes de desmonte y terraplenado sean. Todos estos factores hacen que descartemos la cuneta triangular como solución.

Tras lo expuesto, únicamente contamos con dos soluciones que a priori parecen factibles y viables y que por lo tanto deberemos realizar una comparación más detallada de ambas.

A continuación se exponen en dos tablas los datos más relevantes para la elección final de la alternativa que se propondrá y se redactará en el siguiente Anejo.

Tabla 3. Factores técnicos.

Solución 2 D=1.3m.	Longitud	Área Excavación ( $\text{m}^2$ )	Área Relleno ( $\text{m}^2$ )	Vol. Excavación ( $\text{m}^3$ )	Vol. Relleno ( $\text{m}^3$ )	Nº Pozos
Quebrada1	4090	1.6	2	6544	8180	41
Quebrada2	2840	1.5	2.92	4260	8292.8	28
TOTAL				10804	16472.8	69

Solución 3 D=1.6m.	Longitud	Área Excavación (m <sup>2</sup> )	Área Relleno (m <sup>2</sup> )	Vol. Excavación (m <sup>3</sup> )	Vol. Relleno (m <sup>3</sup> )	Nº Pozos
Quebrada2	2840	2.4	2.7	6816	7668	28

Tal y como se aprecia en esta tabla la solución dos requiere mayor volumen de excavación y de relleno. Es natural este resultado dado que se trata de canalizar cada quebrada por separado y drenar el caudal que recogen fuera del parque. Con esta solución aumentan los metros de tubería pero disminuye el diámetro de las mismas dado que el caudal recogido por cada una de ellas es menor.

En la descripción de la solución numero dos se muestran los perfiles de ambas quebradas los cuales se seguirán por tramos de pendiente constante con lo que este factor que garantiza la velocidad del flujo y el arrastre de sedimentos será igual para ambas soluciones. Los pozos de registro se dispondrán en ambas soluciones cada cien metros de tubería para una vez construida y en funcionamiento poder realizar inspecciones y garantizar su buen funcionamiento.

La solución numero tres presenta menores volúmenes de excavación y de relleno y una menor longitud de tubería. A su vez se acortan los plazos de ejecución y se requiere de un menor número de pozos de registro.

En la siguiente tabla se recoge una valoración económica simplificada de ambas soluciones.

Tabla 4. Factores económicos.

Unidades de obra	Solución 2		Solución 3	
	Euros (€)	Pesos chilenos (CLP)	Euros (€)	Pesos chilenos (CLP)
Precio tubería por metro	160.37 €		160.37 €	
Precio total tubería	1,111,364.10 €	766,718,978.95 CLP	455,450.80 €	314,210,952.41 CLP
Precio pozo de registro	798.13 €		798.13 €	
Precio total pozo de registro	55,070.97 €	37,992,911.49 CLP	22,347.64 €	15,417,413.36 CLP
Precio excavación m <sup>3</sup>	1.20 €		1.20 €	
Precio total excavación	12,964.80 €	8,944,285.87 CLP	8,179.20 €	5,642,748.29 CLP
Precio relleno m <sup>3</sup>	2.97 €		2.97 €	
Precio total relleno	48,924.22 €	33,752,327.38 CLP	22,773.96 €	22,773.96 CLP
TOTAL	1,228,324.09 €	847,408,503.69 CLP	508,751.60 €	350,982,641.32 CLP

Los precios que se muestran son de las unidades de obra más relevantes para la ejecución de sendas alternativas. Con ellos se pretende dar una valoración económica aproximada de la cual se pueda obtener la solución más factible a nivel económico.

El precio de las unidades se ha obtenido en euros y en pesos chilenos dado que se trata de un proyecto para un cliente chileno.

Como vemos en la tabla la alternativa número tres es mucho más económica que la alternativa dos, esto se debe a la menor longitud de tubería, menores volúmenes de excavación y relleno y menor número de pozos de registro.

En resumen, la alternativa tres es la seleccionada fundamentalmente por su menor coste de ejecución, menor plazo de construcción, menores costes en el mantenimiento y mayor sencillez en la construcción.

El desarrollo de esta alternativa se realizará en el Anejo 07 (Diseño de la solución adoptada), en el cual se expondrán todos los factores que afecten a su diseño.

