

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

Trabajo Fin de Grado: Diseño geotécnico de una balsa para riego sobre suelos blandos de marisma.

Autor: Raúl Varo Varo

Tutor: Juan Diego Bauzá Castelló

**Dpto. Estructuras de Edificación e Ingeniería del
Terreno**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Trabajo Fin de Grado: Diseño geotécnico de una balsa para riego sobre suelos blandos de marisma

Autor:
Raúl Varo Varo

Tutor:
Juan Diego Bauzá Castelló
Profesor Asociado

Dpto. Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Diseño geotécnico de una balsa para riego sobre suelos blandos de marisma

Autor: Raúl Varo Varo

Tutor: Juan Diego Bauzá Castelló

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas a aquellas personas que han contribuido de manera significativa en la realización de este trabajo de fin de grado de Ingeniería Civil.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi familia por su constante apoyo y aliento a lo largo de este arduo proceso, en especial a mi madre Montserrat Varo Sánchez y a mi padre José Varo Daza, por poder hacer mi sueño realidad y facilitarme el camino en todo lo posible. También agradecer a mis hermanos José Manuel, Adrián y Marina por apoyar y hacer que el trascurso de estos años se hiciera más amenos. Su amor incondicional y comprensión han sido mi mayor fuente de fortaleza.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado durante estos años de estudio, como han sido mis amigos de Universidad Andrés y Ricardo, y por supuesto sin olvidarme de mi compañero de piso Manuel que hemos estado juntos desde el colegio y nos hemos acompañado hasta el final de nuestra etapa estudiantil. Les agradezco por su compañía, motivación y por compartir conmigo momentos tanto de alegría como de desafío. Su amistad ha sido invaluable.

A mis profesores, en especial Juan Diego Bauza Castello ya que sin el no podría haber realizado el broche final a esta etapa, cuya dedicación y conocimientos han guiado mi aprendizaje en este campo de la Ingeniería Civil, le estoy enormemente agradecido.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todos aquellos que, de una forma u otra, han contribuido a la culminación de este trabajo. Vuestra colaboración y apoyo han sido fundamentales para alcanzar este logro.

¡A todos muchas gracias!

Raúl Varo Varo
Trabajo fin de grado Ingeniería Civil
Sevilla, 2024

Resumen

Este documento detalla el diseño y la construcción de una balsa en un terreno arcilloso de marisma, un proyecto crucial en el ámbito de la ingeniería civil. Los suelos blandos presentan desafíos específicos que deben abordarse con cuidado durante todas las etapas del proyecto, desde la planificación hasta la ejecución.

El objetivo principal del proyecto fue proporcionar una solución efectiva y duradera para la retención y gestión del agua en un área específica. Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo diversas etapas, comenzando con un análisis detallado del terreno y su comportamiento frente a la presencia de agua y del sismo.

En conclusión, el diseño y la construcción de la balsa en terrenos blandos representaron un desafío técnico significativo que se abordó con éxito mediante un enfoque meticuloso y adaptado a las condiciones específicas del sitio.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
1 Estructura del trabajo fin de grado	1
2 Informe Geológico	3
2.1 <i>Análisis de Ortofoto.</i>	3
2.1.1 Año 1956-1957	5
2.1.2 Año 1973-1986	5
2.1.3 Año 1997-1998	6
2.1.4 Año 1997-2003	6
2.1.5 Año 2004-2016	6
2.1.6 Año 2022	7
2.2 <i>Introducción a la cartografía geológica</i>	7
2.2.1 Cartografía geológica 1:1000000 (IGME)	8
2.2.2 Cartografía geológica 1:50000 (IGME)	9
2.2.3 Cartografía geológica 1:200000 (IGME)	12
2.2.4 Conclusión	19
3 Informe Geotécnico	20
3.1 <i>Características geotécnicas del subsuelo</i>	20
3.1.1 Trabajos realizados	20
3.1.2 Parámetros de las arcillas ocreas con bivalvos (Terreno natural)	21
3.1.3 Parámetros para la cimentación de la balsa compuesto por arcilla marrón plástica. (Terreno natural)	21
3.1.4 Parámetros para el cuerpo de la balsa compuesto por arcilla marrón plástica. (Terreno Compactado)	22
3.1.5 Niveles geotécnicos	23
3.2 <i>Sismo</i>	31
3.3 <i>Expansividad</i>	32
3.4 <i>Agresividad química del suelo</i>	33
3.5 <i>Nivel freático</i>	33
4 Cálculo de la balsa	35
4.1 <i>Bases de cálculo</i>	35
4.2 <i>Predimensionamiento geométrico</i>	36
4.3 <i>Cálculo de estabilidad.</i>	38
4.3.1 Métodos de comprobación.	38
4.3.2 Comprobación por equilibrio límite (EL).	38
4.3.3 Comprobación por método de los elementos finitos (MEF).	44
4.3.4 Conclusiones.	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1. Espesor del terreno natural en el estrato suelo vegetal	23
Tabla 3–2. Espesor del terreno natural en las arcillas marrones plásticas	24
Tabla 3–3. Parámetros de identificación y estados del terreno natural en las arcilla marrones plásticas.	24
Tabla 3–4. Parámetro de resistencia del terreno natural en las arcilla marrones plásticas.	24
Tabla 3–5. Dimensiones del terreno natural en las arcillas ocre con bivalvos	26
Tabla 3–6. Parámetros de identificación y estados del terreno natural en las arcillas ocre con bivalvos.	27
Tabla 3–7. Parámetro de resistencia del terreno natural en las arcillas ocre con bivalvos.	27
Tabla 3–8. Espesores y cotas del terreno compactado en el suelo vegetal	28
Tabla 3–9. Espesores y cotas del terreno compactado en las arcillas marrones plásticas	29
Tabla 3–10. Parámetros de identificación y estados del terreno compactado en las arcillas marrones plásticas.	29
Tabla 3–11. Parámetro de resistencia terreno compactado en las arcillas marrones plásticas.	30
Tabla 3–12. Datos para la aceleración de cálculo	32
Tabla 3–13. Determinación de expansividad a partir de ensayos.	32
Tabla 3–14. Agresividad química del suelo	33
Tabla 3–15. Agresividad química del agua	33
Tabla 3–16. Cotas del nivel freático.	33
Tabla 4–1. Parámetros para el ábaco de Taylor.	36
Tabla 4–2. Parámetros para la modelización del flujo en Geoestudio.	39
Tabla 4–3. Parámetros introducidos en Geoestudio.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ortofoto por Geamap año 1956-1957 derecha	3
Figura 2-2. Ortofoto actual (Google Earth).	3
Figura 2-3. Ortofoto por Geamap 1956-1957.	5
Figura 2-4. Ortofoto por Geamap 1973-1986.	5
Figura 2-5. Ortofoto por Geamap 1997-1998.	6
Figura 2-6. Ortofoto por Geamap 1997-2003 ; Abertura del canal.	6
Figura 2-7. Ortofoto por Geamap 2004-2016.	7
Figura 2-8. Ortofoto por Geamap 2022.	7
Figura 2-9. Situación geográfica de la balsa.	8
Figura 2-10. Cartografía 1:1000000 mapa geológico de España y Portugal (IGME); Ubicación de la balsa	8
Figura 2-11. Cartografía 1:50000 (IGME); Ubicación balsa	9
Figura 2-12. Leyenda 1; 1:50000.	9
Figura 2-13. Sondeo de cartografía hidrológica con zona de aparición de acuíferos a través de lumaquelas (IGME).	11
Figura 2-14. Cartografía hidrológica (IGME).	11
Figura 2-15. Mapa geotécnico general Ayamonte-Huelva 1:200000 (IGME)	12
Figura 2-16. Cartografía 1:200000;	13
Figura 2-17. Cartografía 1:200000;	13
Figura 2-18. Cartografía 1:200000;	13
Figura 2-19. Cartografía 1:200000;	13
Figura 2-20. Mapa de formación superficial y sustrato; Ubicación. Leyenda	14
Figura 2-21. Mapa de características geomorfológicas (IGME); Ubicación	15
Figura 2-22. Leyenda de separación de zonas	15
Figura 2-23. Leyenda de interpretación	15
Figura 2-24. Mapa de características hidrológicas (IGME (<i>Instituto geológico y minero de España.</i> , s. f.)); Ubicación.	16
Figura 2-25. Leyenda de condiciones de drenaje.	16
Figura 2-26. Leyenda de permeabilidad de materiales.	16
Figura 2-27. Leyenda de simbología	17
Figura 2-28. Leyenda de factores hidrológicos.	17
Figura 2-29. Mapa de características geotécnicas (IGME).	17
Figura 2-30. Leyenda de grado de sismicidad.	18
Figura 2-31. Leyenda de asientos previsibles.	18
Figura 2-32. Leyenda de capacidad de carga.	18

Figura 3-1. Ubicación de sondeos y calicatas en la balsa.	21
Figura 3-2. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno natural de las arcillas ocre con bivalvos.	21
Figura 3-3. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno natural de las arcillas marrones plásticas.	22
Figura 3-4. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno compactado.	22
Figura 3-5. Tabla 2.4.3 ROM(Soriano Peña, 2005) .	26
Figura 3-6. Mapa sísmico de la norma sismorresistente NCSE-02 (Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación & Ministerio de fomento, s. f.).	31
Figura 3-7. Tabla expansividad libro Luis González Vallejo.	32
Figura 4-1. Coeficientes de seguridad del manual de balsas(Editorial: TyB editores & Ministerio de medioambiente, 2010) .	35
Figura 4-2. Ábaco de Taylor.	37
Figura 4-3. Dique impermeabilizado con geomembrana (Manual para el diseño construcción y explotación de mantenimiento de balsas).	37
Figura 4-4. Esquema de distintas situaciones de cálculo.	40
Figura 4-5. Factores de seguridad con talud 1:5 a ambos lados.	41
Figura 4-6. Factores de seguridad con talud interior de 1:3 y exterior de 1:6.	41
Figura 4-7. Imagen talud exterior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 corto plazo.	42
Figura 4-8. Imagen talud exterior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 largo plazo.	42
Figura 4-9. Imagen talud interior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 corto plazo.	43
Figura 4-10. Imagen talud interior Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 largo plazo.	43
Figura 4-11. Visualización del modelo en el software Plaxis.	45
Figura 4-12. Visualización de los materiales en el software Plaxis.	45
Figura 4-13. Visualización de los parámetros del geotextil en el software Plaxis.	45
Figura 4-14. Visualización de la mitad del talud en el software de Plaxis.	46
Figura 4-15. Visualización del talud completo en el software de Plaxis.	46
Figura 4-16. Valores finales de los coeficientes de seguridad.	47
Figura 4-17. Croquis balsa.	48
Figura 4-18. Croquis drenaje.	48

1 ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El estudio para la formación de la balsa se ha segmentado en tres partes diferenciadas: el estudio geológico, el estudio geotécnico y el estudio de cálculo. Inicialmente, se ha proyectado la información mediante informes geotécnicos y geológicos, respaldados por estudios de laboratorio realizados por personal cualificado. El objetivo de estos informes es llegar a parámetros concluyentes que formen la base para el diseño y cálculo de la balsa.

La estructura del trabajo de fin de grado se detalla a continuación, resaltando los puntos clave que conforman la base y el proceso de obtención de datos de forma cronológica:

- Se ha realizado una investigación cartográfica geológica y geotécnica utilizando ortofotos recopiladas desde 1956 hasta la actualidad. Esto permite conocer los cambios geomorfológicos en el terreno y entender el entorno que rodea a la balsa. Además, se ha obtenido información de mapas geológicos a distintas escalas, lo que proporciona detalles sobre las particularidades del terreno y su composición geológica.
- El estudio de los datos de las campañas geotécnicas ha sido el aspecto más relevante. Se han obtenido tres campañas, cuyos datos se han homogeneizado para proporcionar resultados unificados.
- A partir del estudio de los datos de las campañas geotécnicas, se han extraído parámetros del terreno que se han resumido en tablas para su incorporación en los softwares correspondientes.
- Se ha realizado un predimensionamiento de la balsa mediante aproximaciones geométricas para lograr el equilibrio de tierras necesario.
- Cálculo la estabilidad de la balsa utilizando el método de equilibrio límite para una aproximación geotécnica y el método de los elementos finitos para un cálculo más preciso y definitivo.
- Finalmente, se presenta la conclusión del trabajo de fin de grado, donde se aclara el resultado obtenido.

2 INFORME GEOLÓGICO

La balsa está situada en el término municipal de Aznalcázar, en la provincia de Sevilla, al sur de la localidad de Villamanrique de la Condesa, cerca del Parque Natural de Doñana y la localidad de Isla Mayor. La parcela se encuentra dentro de una finca privada, bordeada por el canal del Guadamar, con un relieve prácticamente plano, ya que se ubica dentro del Valle del Guadalquivir.

Los terrenos están cubiertos con vegetación de matorral y están destinados a la construcción de una balsa de riego. Según la serie Magna del IGME (Instituto Geológico y Minero Español), se ha tomado como referencia la hoja del Rocío 1.018, con unas coordenadas aproximadas de la balsa de 37°07'42''N ; 6°17'48''W.

2.1 Análisis de Ortofoto.

Para contextualizar las modificaciones que ha experimentado la zona de estudio a lo largo de la historia, se han obtenido varias ortofotos de las fuentes Geomap y Google Earth, correspondientes a diferentes años, con el fin de analizar dichos cambios.

Como introducción, se han seleccionado dos ortofotos: una de 1956 y otra de 2024 (actual). En la ortofoto de 1956, que proviene de la recopilación inicial de datos, se observa un terreno totalmente inerte y natural, donde aún se conserva el cauce natural del Caño de Guadamar. También se puede notar la aparición de las primeras tierras de cultivo en el lado derecho del Río Brazo de la Torre.

En contraste, en la ortofoto actual se aprecia que el Caño de Guadamar ha desaparecido en gran medida, dando lugar a un terreno predominantemente de cultivo, hasta llegar a la zona protegida por el parque natural de Doñana.



Figura 2-1. Ortofoto por Geomap año 1956-1957 derecha brazo de la torre izquierda Guadamar.



Figura 2-2. Ortofoto actual (Google Earth).

Para obtener con mayor detalle las modificaciones sufridas por el paso de los años se ha querido desgranar dentro de lo necesario y útil el transcurso de los años desde 1956 hasta la actualidad.

2.1.1 Año 1956-1957

En la ortofoto de 1956-1957, podemos observar una zona con poca intervención humana. En el centro de la fotografía, se visualiza el Caño del Guadiamar, ramificado en la parte superior en dos vertientes que, con el tiempo, desaparecerán. En la zona derecha de la fotografía aparece otro río denominado Brazo de la Torre, el cual se mantiene hasta la actualidad, con zonas de cultivo en su orilla derecha. Además, se pueden identificar áreas parcialmente inundadas en la zona de estudio, con pequeños montículos de terreno donde finalmente se establecerá la estructura. Se sabe que estos montículos están formados por limos y sal.



Figura 2-3. Ortofoto por Geamap 1956-1957.

2.1.2 Año 1973-1986

A partir de 1973, se puede observar la casi total desaparición de la antigua marisma. Las dos ramificaciones del Caño del Guadiamar desaparecen, dando lugar a la construcción de diques longitudinales de tierra, ejecutados por el hombre y paralelos al caño, para servir a los cultivos colindantes. La vertiente denominada Brazo de la Torre mantiene su curso principal, pero con una notable disminución del caudal del río.

En la zona de estudio, es importante prestar especial atención, ya que se intentó reconducir el caño con los diques mencionados anteriormente. Por lo tanto, durante esa fecha, se sigue transportando agua en la zona de estudio.



Figura 2-4. Ortofoto por Geamap 1973-1986.

2.1.3 Año 1997-1998

A partir de 1997, se puede observar la transformación del terreno colindante al Caño del Guadamar en áreas de cultivo, así como la casi total desaparición del propio caño. También ha desaparecido el agua que albergaba el canal provisional que pasaba junto a la zona de estudio, aunque se conserva la silueta del mismo.



Figura 2-5. Ortofoto por Geamap 1997-1998.

2.1.4 Año 1997-2003

Se puede observar la aparición de canales artificiales que conectan el Caño de Guadamar con el Brazo de la Torre, permitiendo que el agua vuelva a llegar a la zona de estudio.



Figura 2-6. Ortofoto por Geamap 1997-2003 ; Abertura del canal.

2.1.5 Año 2004-2016

Desde 2004 hasta 2016, los cambios más significativos han sido las variaciones en las dimensiones de los distintos cultivos y su ampliación, lo que ha provocado desecaciones en el Caño del Guadamar.



Figura 2-7. Ortofoto por Geamap 2004-2016.

2.1.6 Año 2022

A partir de 2019, se aprecia la desecación casi total del Caño del Guadamar, por lo que solo el Brazo de la Torre proporciona agua a las zonas de cultivo.



Figura 2-8. Ortofoto por Geamap 2022.

2.2 Introducción a la cartografía geológica

La presente cartografía geológica representa un esfuerzo integral para comprender y visualizar las características geológicas de la zona que rodea la balsa. La cartografía ha sido obtenida del IGME en forma de planos a escalas 1:50,000, 1:1,000,000 y 1:200,000.

La balsa se encuentra ubicada en el término municipal de Aznalcázar, abarcando un área de aproximadamente 84.76 hectáreas. Esta región presenta una diversidad geológica significativa, caracterizada principalmente por la presencia de limo y sal, lo que da lugar a una formación de zona salobre. En menor medida, también se encuentran limos y arenas, formando una zona de marismas.

La importancia de esta cartografía radica en su capacidad para ofrecer una visión detallada de la geología del área, facilitando la toma de decisiones informadas durante todas las etapas del proyecto. Estos mapas serán una herramienta valiosa para la gestión de la balsa, contribuyendo a una planificación eficiente y a la mitigación de riesgos asociados a factores geológicos.

En el transcurso del documento, se proporcionará una visión general de las principales características geológicas identificadas, destacando los aspectos clave que deben considerarse para asegurar la estabilidad y eficiencia de la balsa. Además, se detallarán las metodologías utilizadas en el proceso de cartografía geológica y se ofrecerán leyendas para la interpretación efectiva de la información presentada en el mapa.

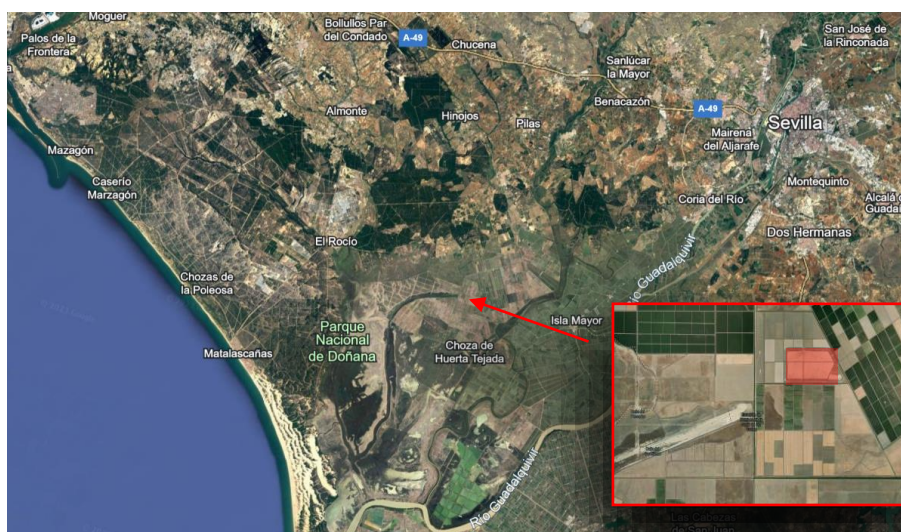


Figura 2-9. Situación geográfica de la balsa.

2.2.1 Cartografía geológica 1:1000000 (IGME)

Centrándonos en la cartografía a escala 1:1000000, a nivel general, podemos visualizar una zona perteneciente al valle del Guadalquivir, representada en tonos grisáceos y codificada como 174. Este código identifica terrenos compuestos por conglomerados, areniscas, gravas, arenas, limos y arcillas. Como se ha especificado anteriormente, los terrenos en esta área están formados concretamente por limos, arcillas y sal.

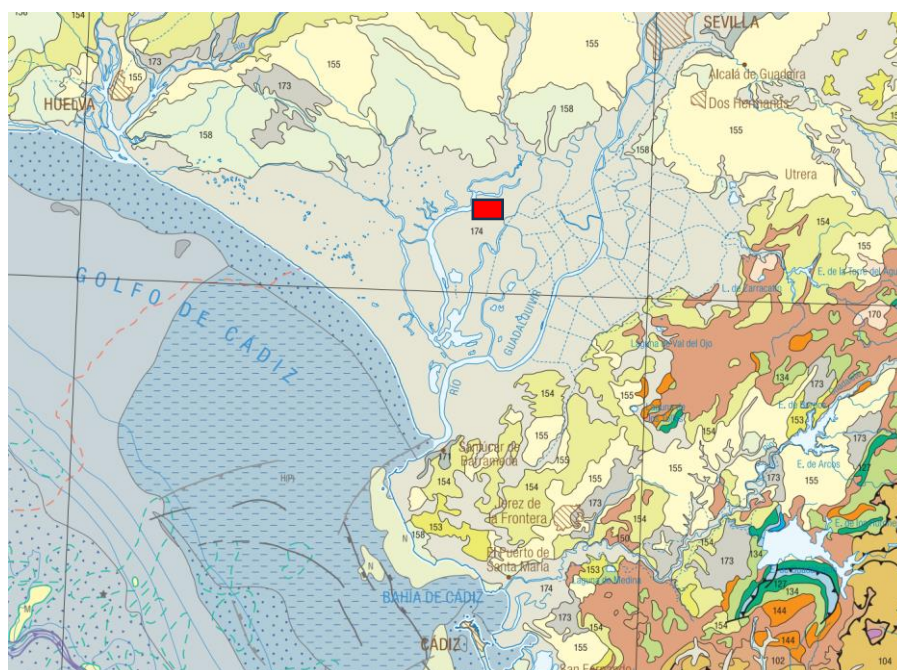


Figura 2-10. Cartografía 1:1000000 mapa geológico de España y Portugal (IGME); Ubicación de la balsa

2.2.2 Cartografía geológica 1:50000 (IGME)

Los datos obtenidos del mapa a escala 1:50,000 del IGME indican lo siguiente:

La Balsa se encuentra ubicada en una zona constituida principalmente por tres materiales geológicos:

- QM1: Limos
- QM2: Limos y Arenas
- QM3: Limo y Sal

Estos materiales están representados en la leyenda del mapa como parte de las Marismas y Formación Salobre del Cuaternario.

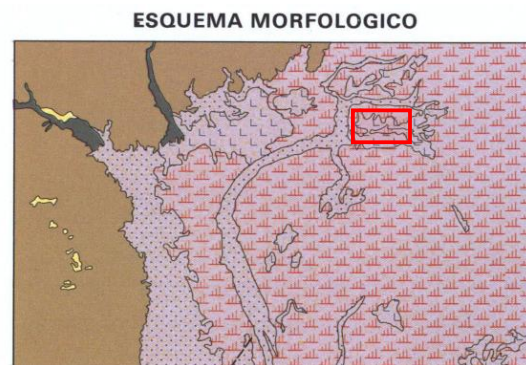


Figura 2-11. Cartografía 1:50000 (IGME); Ubicación balsa

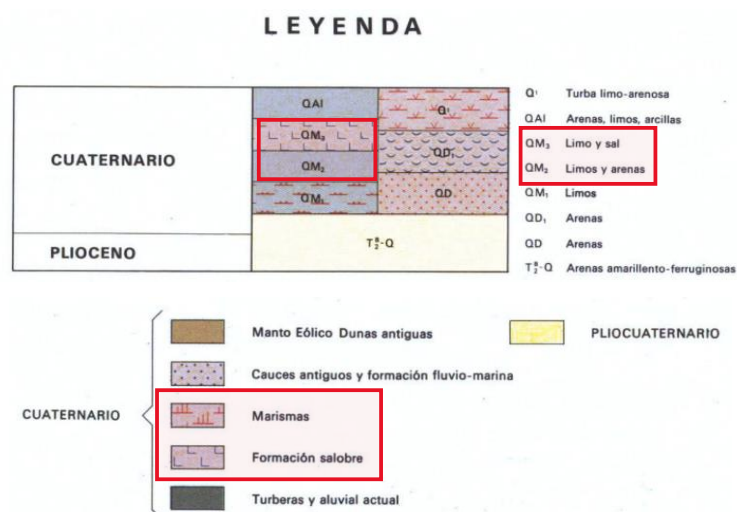


Figura 2-12. Leyenda 1; 1:50000.

2.2.2.1 Tipos de sedimentos

A nivel de introducción general, la Hoja de El Rocío está constituida por sedimentos Cuaternarios que descienden suavemente hacia el sur, donde están cubiertos por marismas o sedimentos eólicos.

La topografía de la zona es similar a la del resto del valle del Guadalquivir, caracterizada por depósitos fluviales generalmente llanos, ubicados en una de las primeras terrazas del río y cercanos al Parque Natural de Doñana.

2.2.2.2 Estratigrafía

Cuaternario

El Cuaternario en la Hoja de El Rocío se caracteriza por la presencia de marismas, representadas por los materiales QM1, QM2 y QM3, los cuales muestran características similares con cambios abruptos en los laterales.

- **QM1:** Estos sedimentos son típicos de llanuras de inundación antiguas. Tienen una potencia que varía entre 7 y 25 metros y están compuestos principalmente por sedimentos terrígenos muy finos, como limos y arcillas, con una proporción variable de arena fina hacia la base y arena gruesa y gravillas hacia la parte superior. Estos sedimentos corresponden a antiguos cauces y márgenes de la red fluvial del Guadalquivir. Su morfología es característica de zonas cercanas a la desembocadura del río, con meandros amplios y extensas llanuras de inundación.
- **QM2:** Se encuentran sobre los QM1, de manera discordante en algunos sectores, con una potencia que va desde 20 cm hasta 5 metros. Son principalmente arcillas limoníticas y/o limonitas con transición a fangositas. Estos sedimentos ocupan la mayor parte de las marismas y están sujetos a inundaciones periódicas.
- **QM3:** Estos sedimentos son los más recientes y se encuentran en las cotas más bajas, con alturas que van de 0 a 2 metros. Son zonas deprimidas donde las aguas de inundación o escorrentía se estancan. Debido a la evaporación, estas aguas se cargan fuertemente de sales, lo que configura la litología de estos sedimentos. Son principalmente arcillas y/o fangositas con láminas de sal. Durante períodos de sequía, es común observar suelos poligonales y grietas de retracción en esta área.

Estas descripciones geológicas son fundamentales para entender la composición y la dinámica de las marismas en la Hoja de El Rocío, proporcionando información clave para la gestión y conservación de este importante entorno natural.

2.2.2.3 Hidrogeología

Referente al punto actual nos encontramos en una zona de marismas como se puede apreciar en el mapa siguientes, y cercanos a una zona de agua estacional refiriéndose al cauce del Guadiamar.

Existe una serie potente (50-70 m), de edad Pliocuaternalia y Cuaternaria con alta permeabilidad, que descansa sobre los niveles Andalucienses bastante impermeables. En las zonas de superficie y en zonas marginales la permeabilidad del Andaluciense y el Pliocuaternalio es escasa. En el centro de la cuenca donde existen frecuentes intercalaciones arenosas y potentes lumaquelas esta permeabilidad aumenta mucho, con lo cual estos tramos adquieren gran importancia como acuíferos. Los sondeos dan lugar a un caudal de 40 y 120 l/s lo que nos permite darnos una idea aproximada de la enorme importancia del acuífero.

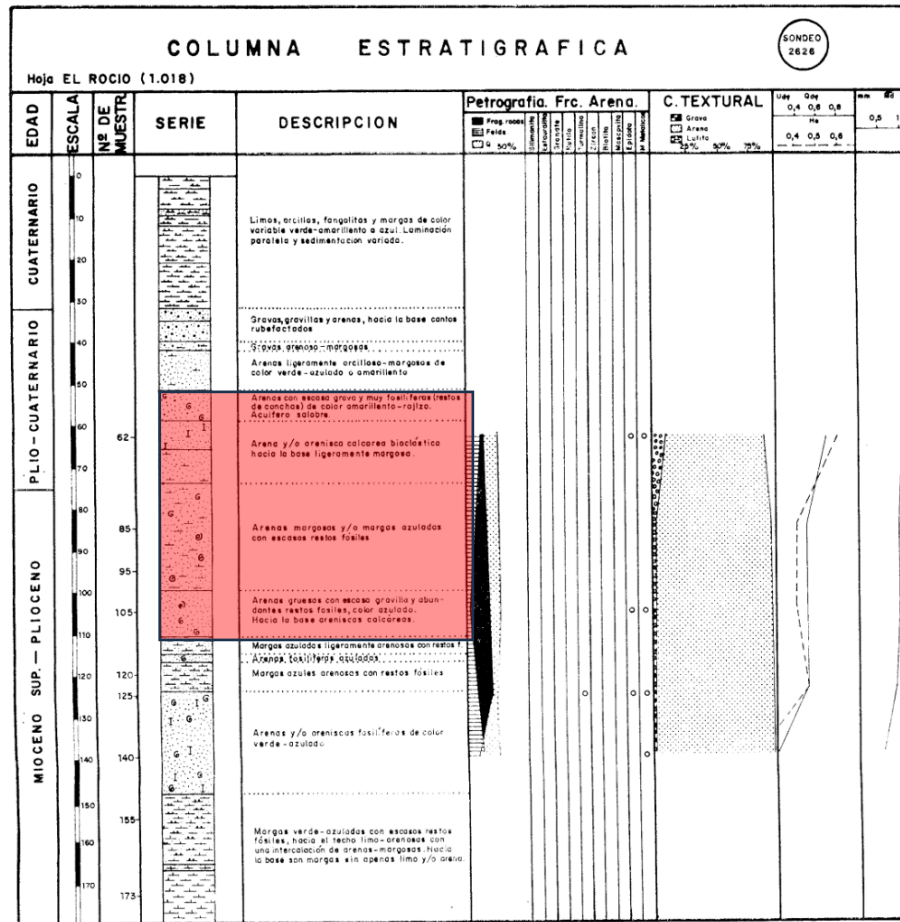


Figura 2-13. Sondeo de cartografía hidrológica con zona de aparición de acuíferos a través de lumaquelas (IGME).

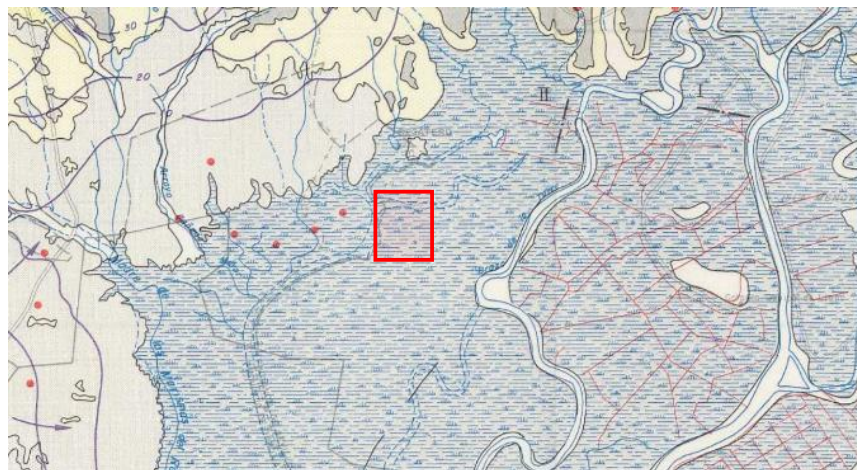


Figura 2-14. Cartografía hidrológica (IGME).

La zona encuadrada dentro del mapa de la cartografía hidrológica pretende informar acerca del curso del agua estacional a través de líneas azules discontinuas provenientes del caño del Guadiamar colindante a la balsa, las zonas azules rayadas corresponden al área que conforman la marisma compuesta por: Limos, cantos, gravas y

arcillas, a veces con sal, alternancia de capas de origen fluvial, formadas por cantos, gravas y arenas y capas de origen marino, constituidas por arcillas. Alto gradiente salino por una interfase de agua dulce-agua salada.

2.2.3 Cartografía geológica 1:200000 (IGME)

Para concluir este apartado, la información obtenida del Mapa Geotécnico del Instituto Geológico y Minero Español (IGME) a escala 1:200,000 indica lo siguiente:

El área en cuestión se encuentra en una región de formaciones recientes postorogénicas del valle del Guadalquivir, dentro del dominio subbético, denominada como formación I1.

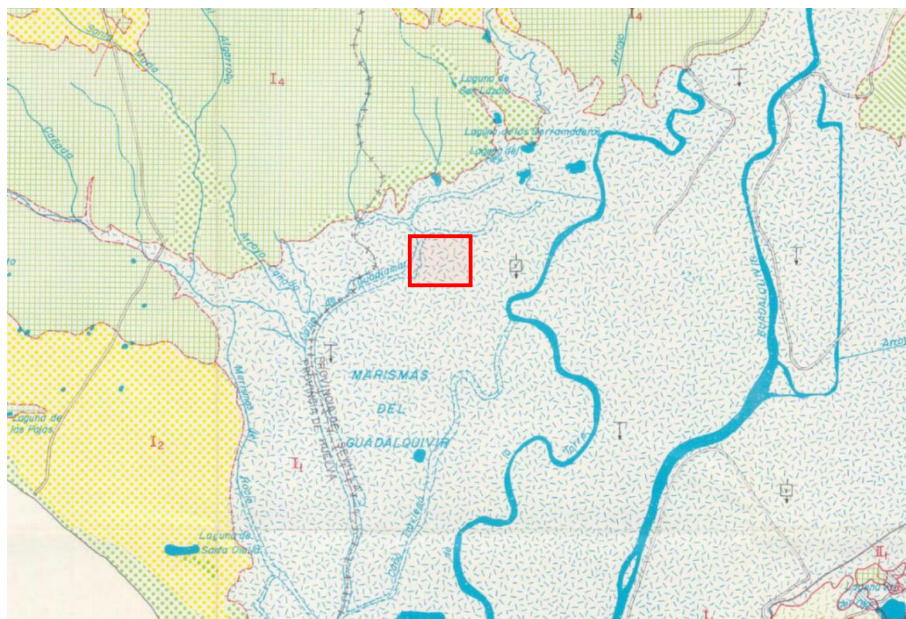


Figura 2-15. Mapa geotécnico general Ayamonte-Huelva 1:200000 (IGME)

Según el mapa adjunto y las leyendas correspondientes, podemos extraer datos muy relevantes para el área I1 donde se encuentra nuestra balsa, según el mapa a escala 1:200,000 del IGME:

- **Características del terreno:** El área está compuesta por rellenos arcillosos y limosos, o arenosos limosos, generalmente salinos, saturados y con plasticidad variable. La morfología es plana y regular, con relieve llano o suave y desniveles muy pequeños, dependiendo si se trata de marismas o llanuras aluviales.
- **Propiedades de permeabilidad y drenaje:** El terreno es impermeable con drenaje muy deficiente en zonas de marismas y pantanosas, mientras que en zonas fluviales varía de semipermeable a permeable con un drenaje aceptable.
- **Nivel freático:** Hay capas freáticas superficiales y otras más profundas asociadas a acuíferos cautivos.
- **Capacidad de carga:** Es media a baja en las zonas fluviales y baja a muy baja en las zonas de marisma.
- **Problemas potenciales:** Se identifican problemas potenciales como asentamientos significativos, especialmente elevados en zonas de marisma, así como problemas hidrológicos y geotécnicos relacionados con la capacidad de carga del suelo y la presencia de yeso.

Estos datos son fundamentales para evaluar la idoneidad del área para diferentes tipos de proyectos, así como para planificar medidas adecuadas de gestión y mitigación de riesgos geotécnicos y hidrológicos.

CONDICIONES CONSTRUCTIVAS	
Muy favorables	
Favorables	
Aceptables	
Desfavorables	
Muy Desfavorables	

Figura 2-16. Cartografía 1:200000;
Leyenda de condiciones constructivas.

CONCURRENCIA DE 2 PROBLEMAS "TIPO"			
Litológicos y Geomorfológicos		Geomorfológicos e Hidrológicos	
Litológicos e Hidrológicos		Geomorfológicos y Geotécnicos	
Litológicos y Geotécnicos (p.d.)		Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	

Figura 2-17. Cartografía 1:200000;
Leyenda de concurrencia de 2 problemas "Tipo".

PROBLEMAS GEOTECNICOS	NOTACION
De Capacidad de carga	Yesos Y
De Asientos	
Geotécnicos Varios	

Figura 2-18. Cartografía 1:200000;
Leyenda de problemas geotécnicos.

CONDICIONES CONSTRUCTIVAS DESFAVORABLES	
	Problemas de tipo Hidrológico y Geotécnico (p.d.)
	Problemas de tipo Litológico, Geomorfológico e Hidrológico
	Problemas de tipo Litológico, Hidrológico y Geotécnico (p.d.)

Figura 2-19. Cartografía 1:200000;
Leyenda de condiciones constructivas.

2.2.3.1 Formaciones superficiales y sustrato (IGME)

- Depósitos de limos y arcillas de origen fluvio-marino $Q_{ma/4/5}$

La extensión de la zona ocupa terrenos en los cursos bajos de los ríos Guadalquivir, Tinto, Odiel, Guadiana y Piedras. Estos terrenos comprenden áreas de marismas y marjales, caracterizados superficialmente por arcillas de mediana a alta plasticidad, limos arenosos y arenas limosas (clasificados como CL, CH, ML y SM), todos con un índice de salinidad y tonalidades que varían entre gris y marrón oscuro. En profundidad, los depósitos más antiguos del estuario están formados por capas fluviales de cantos rodados, gravas y arenas, así como por capas marinas de arcilla de colores grises, verdes o azules.

La potencia total de este relleno fluvio-marino es variable, pudiendo alcanzar hasta aproximadamente 150 metros. A pesar de que estos terrenos salobres son inicialmente improductivos, se están llevando a cabo programas para su drenaje y lavado, especialmente en el margen izquierdo de la marisma del Guadalquivir, lo cual está permitiendo transformar y habilitar cada vez mayores extensiones de terreno para su uso agrícola.

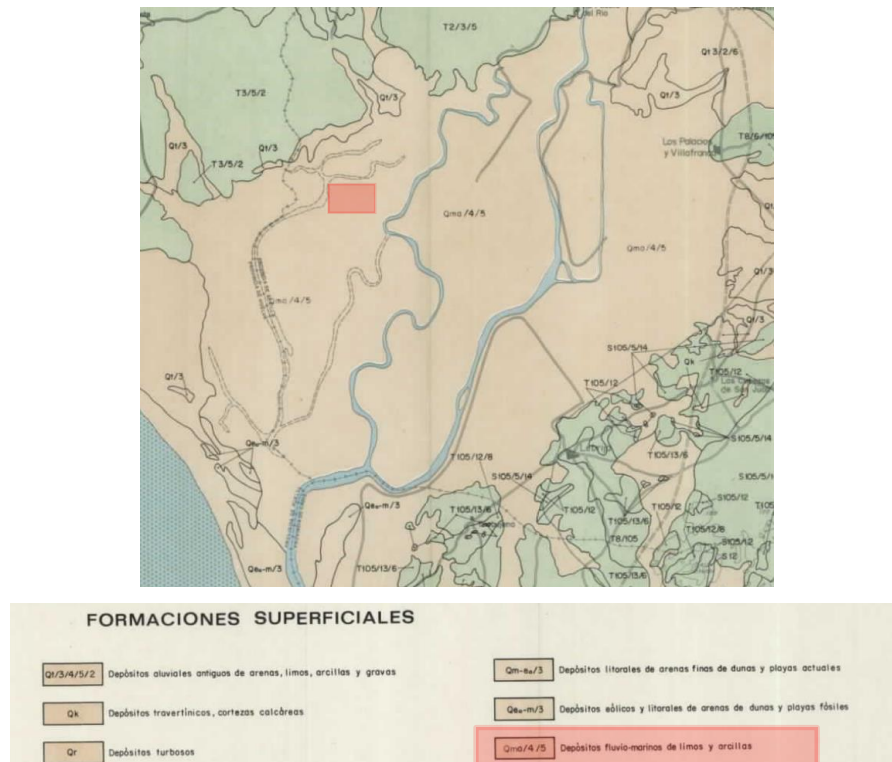


Figura 2-20. Mapa de formación superficial y sustrato; Ubicación. Leyenda

2.2.3.2 Características geomorfológicas (IGME)

- Depósitos de limos, arcillas y arenas $Q_{ma/4/5/3}$ (Area I₁)

La zona presenta una morfología regular, caracterizada por un relieve predominantemente llano con pendientes menores al 7%. Estas características forman alargadas llanuras que alcanzan hasta unos 6 kilómetros de anchura máxima, donde se encajan las redes principales de drenaje.

Los depósitos en esta área son generalmente estables bajo diversas condiciones, tanto naturales como artificiales, y están sujetos principalmente a procesos de erosión y sedimentación fluvial.

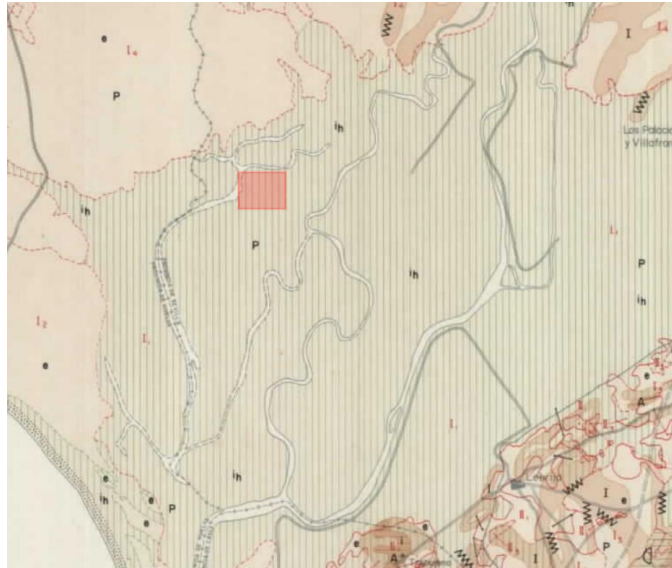


Figura 2-21. Mapa de características geomorfológicas (IGME); Ubicación

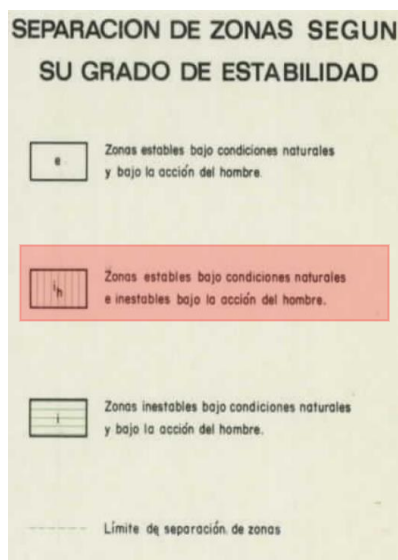


Figura 2-22. Leyenda de separación de zonas según su grado de estabilidad.

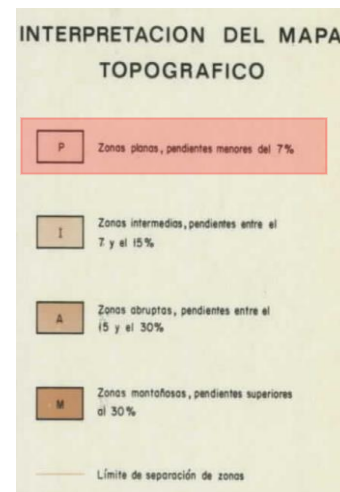


Figura 2-23. Leyenda de interpretación del mapa topográfico.

2.2.3.3 Características hidrogeológicas (IGME)

- Depósitos de limos, arcillas y arenas $Q_{ma/4/5/3}$ (Area I_1)

En conjunto, los terrenos pueden considerarse semipermeables, aunque localmente pueden existir formaciones litológicas con diferentes grados de permeabilidad, lo que favorece en general la filtración y asegura un drenaje aceptable, a pesar de la morfología de relieve llano a suave.

A pocos metros de la superficie del suelo, y variando según la época del año, se encuentran niveles freáticos

claramente definidos en formaciones permeables debido a la porosidad intergranular. En términos constructivos desde el punto de vista hidrológico, las condiciones son medianamente aceptables.

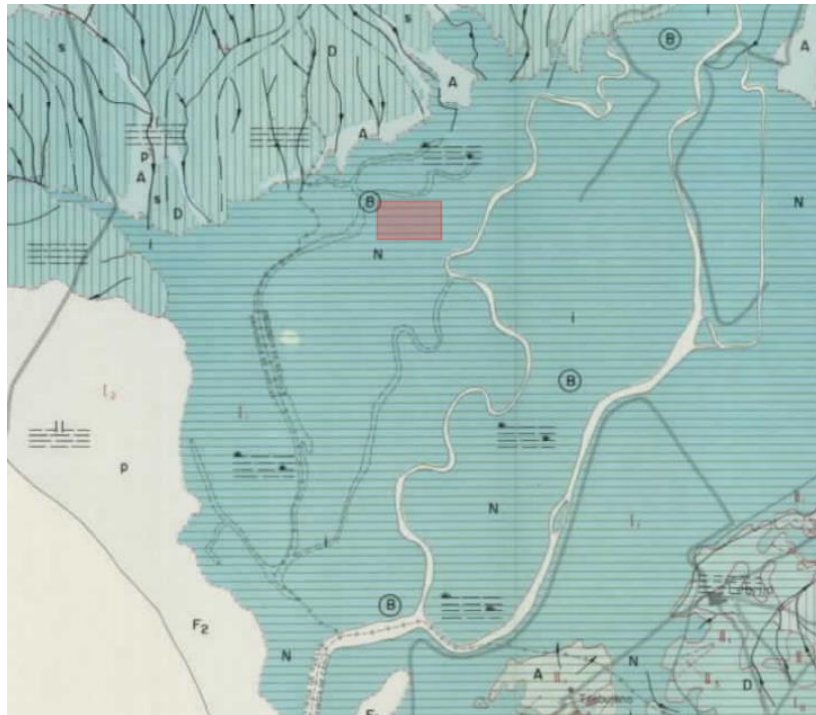


Figura 2-24. Mapa de características hidrológicas (IGME (*Instituto geológico y minero de España.*, s. f.)); Ubicación.

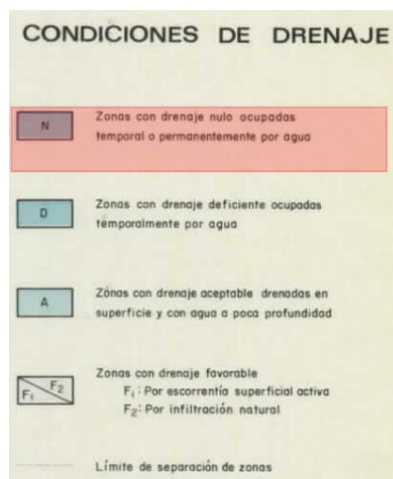


Figura 2-25. Leyenda de condiciones de drenaje.

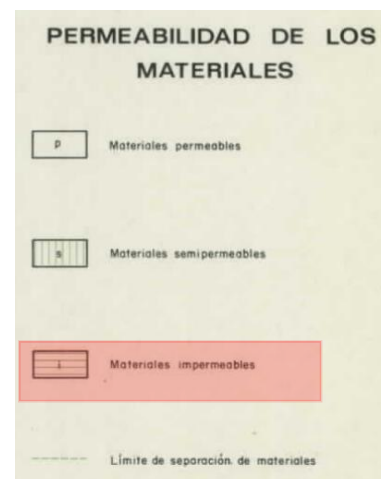


Figura 2-26. Leyenda de permeabilidad de materiales.

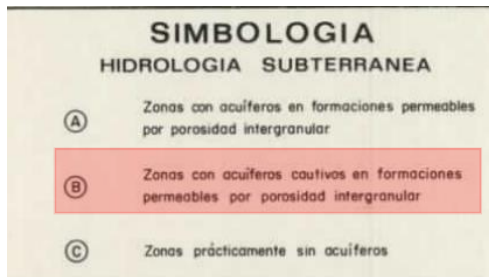


Figura 2-27. Leyenda de simbología hidrología subterránea.

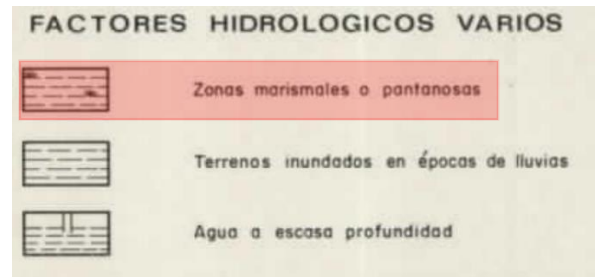


Figura 2-28. Leyenda de factores hidrológicos.

2.2.3.4 Características geotécnicas (IGME)

- Depósitos de limos, arcillas y arenas $Q_{ma/4/5/3}$ (Area I₁)

Son materiales por lo general poco consolidados, con capacidades de carga medias a bajas.

Los asentamientos que pueden producirse serán de magnitud media, con posibilidad de aparición de asentamientos diferenciales en zonas de mayor variedad litológica.

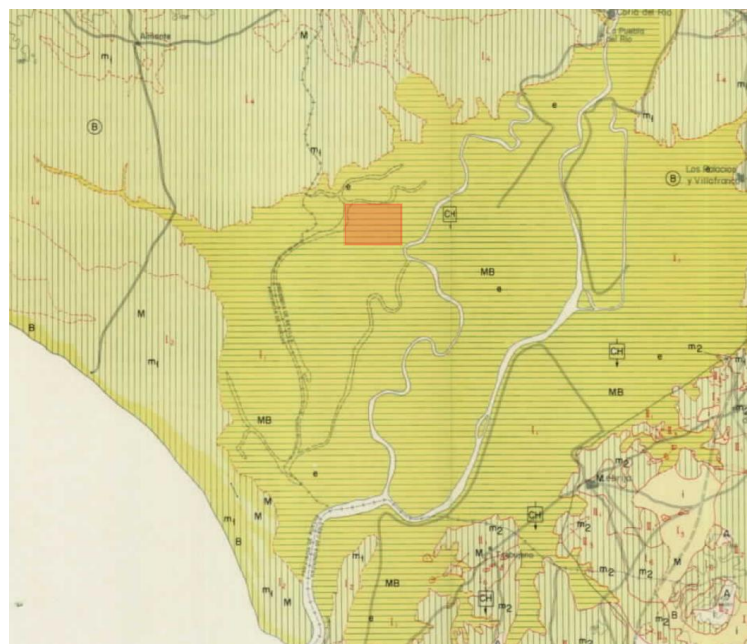


Figura 2-29. Mapa de características geotécnicas (IGME).

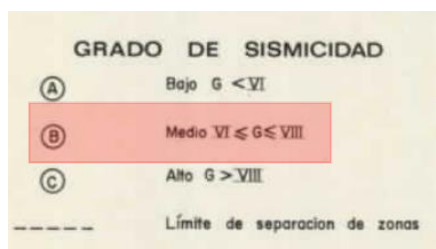


Figura 2-30. Leyenda de grado de sismicidad.

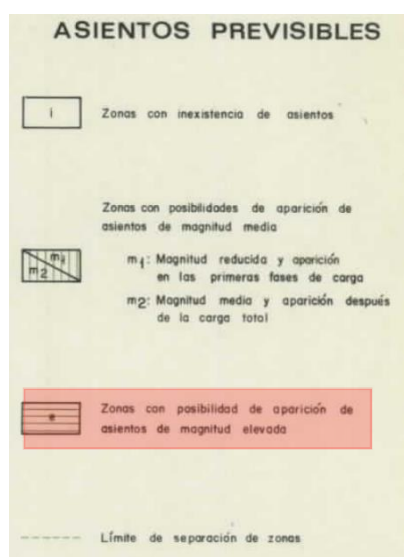


Figura 2-31. Leyenda de asientos previsibles.

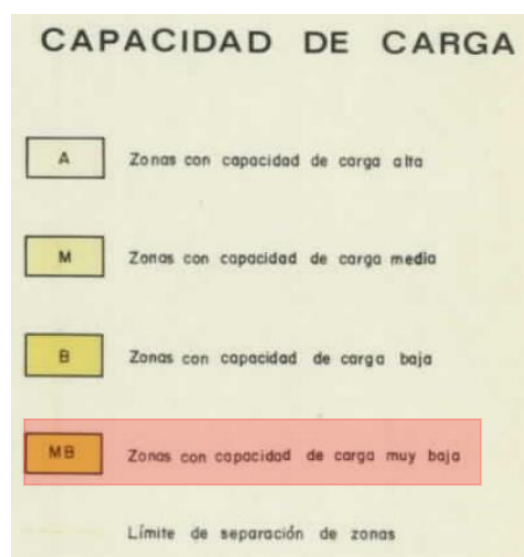


Figura 2-32. Leyenda de capacidad de carga.

En la zona de estudio, la actividad tectónica es mínima, como se describe en los mapas geológicos donde la presencia de fallas es prácticamente inapreciable. Además, la posición geográficamente plana del valle del Guadalquivir no presenta planos de deslizamiento peligroso ni pendientes pronunciadas.

Sin embargo, debido a la proximidad del río Guadalquivir y el caño del Guadamar, es relevante conocer las últimas inundaciones para evaluar si existe una alta probabilidad de que nuestra estructura pueda estar en peligro.

Tras consultar la plataforma del estado del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (SNCZI-IPE), se ha confirmado mediante la implementación de mapas de inundaciones frecuentes y de peligrosidad con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, que no se han registrado modificaciones fluviales significativas en el entorno de estudio. Por lo tanto, se concluye que la estructura no se encuentra en peligro por inundaciones.

2.2.3.5 Terrenos con condiciones constructivas desfavorable (IGME)

- Problemas de tipo hidrológico y geotécnico

Los terrenos de marismas y marjales de los cursos bajos de los ríos Guadalquivir, Tinto, Odiel, Guadiana y Piedras se consideran constructivamente como desfavorables por estar constituidos por suelos de relleno muy modernos, saturados y salinos en general, muy poco o nada consolidados y alta compresibilidad, con capacidades de carga bajas o muy bajas y asientos previsibles de magnitud elevada,

que obligan a que las estructuras de cierta importancia que se construyan sobre estos terrenos, hayan de estar apoyadas necesariamente sobre cimentaciones especiales.

Por otra parte, por su baja altitud sobre el nivel del mar y pendiente totalmente llana, estos terrenos están muy pobremente drenados. con ocupación temporal o permanente por las aguas.

- Problemas de tipo hidrológico, geomorfológico e hidrológico

Los terrenos de margas arcillosas yesíferas situados al SE de la Hoja (Particularmente al NE de la Sierra de Gíbalbín y de la ciudad de Jerez de la Frontera) pueden considerarse constructivamente como desfavorables. Son terrenos en general inestables, con aparición en las zonas de relieve de deslizamientos activos, y en potencia, a favor de las pendientes topográficas; en las zonas más llanas el drenaje es deficiente con aparición de áreas de encharcamiento en épocas de lluvias.

Por otro lado, y debido a su naturaleza yesífera, pueden surgir por la disolución del yeso por la acción del agua, asentamientos bruscos o hundimientos con desperfectos o rotura de las obras al colapsar el terreno. Asimismo, existe el peligro del ataque de las aguas contaminadas en iones sulfatos, a las estructuras construidas con hormigones corrientes.

- Problemas de tipo litológico, geotécnico e hidrológico

Se consideran constructivamente como desfavorables los terrenos de margas azuladas situadas al Norte y Noroeste de la ciudad de Huelva. Estas margas, en origen muy compactas y sobreconsolidada, al quedar expuestas largo tiempo a la interperie, se meteorizan, dando lugar por arcillas muy plásticas en las que se presentan fenómenos de expansividad muy notable, que pueden originar graves problemas en las construcciones asentadas sobre ellas y para las cuales no hayan sido tomadas las debidas precauciones.

También, y debido a esta meteorización, presenta una inestabilidad general que se traduce en deslizamientos de masas arcillosas en zonas de gran relieve o allí donde se ha alterado el equilibrio natural por la acción del hombre.

2.2.4 Conclusión

Dado que la zona es prácticamente natural y se encuentra alejada de poblaciones y núcleos urbanos, con un uso exclusivamente agrícola de la estructura para el desarrollo de cultivos con baja intervención humana, los riesgos y el impacto potencial son mínimos y poco relevantes. La balsa está ubicada en una terraza con una pendiente mínima, inferior al 7%.

En resumen, la zona de estudio es una marisma con un grado medio de sismicidad y una intervención casi constante de flujo hidráulico debido a la proximidad del nivel freático y los ríos cercanos. La geología predominantemente arcillosa y limosa con presencia de material salino en el terreno resulta en una capacidad de carga muy baja, lo que puede causar asientos significativos. En las áreas colindantes hay presencia de yeso, que aunque no constituye un problema directo para la construcción de la balsa, debe tenerse en cuenta.

En términos constructivos, se deben considerar estas características para implementar medidas adecuadas de diseño y construcción que mitiguen cualquier impacto potencial en la estructura destinada al uso agrícola en la zona de marismas.

3 INFORME GEOTÉCNICO

3.1 Características geotécnicas del subsuelo

A continuación, se definen las características geotécnicas de los materiales, basadas en las prospecciones realizadas y en el reconocimiento in situ de los materiales aflorantes y susceptibles de aparecer en profundidad. Los datos han sido recogidos de tres informes geotécnicos pertenecientes a dos empresas diferentes.

El primer informe geotécnico se realizó en el año 2005, pero a una distancia de 2 km de la parcela definitiva, ya que originalmente se pretendía llevar a cabo en otra parcela con dimensiones más pequeñas en ese año. En el año 2015 se retomó otro estudio geotécnico con la misma empresa, esta vez en la ubicación definitiva situada a 2 km de la anterior y con dimensiones más grandes.

Finalmente, en el año 2018, después de 3 años desde la última campaña geotécnica, se contrató a otra empresa para elaborar un nuevo informe geotécnico, debido a que algunos parámetros expuestos por la primera empresa no eran considerados muy fiables.

Los primeros datos del año 2005 se han tenido en cuenta para ajustar los parámetros, aunque no han sido determinantes debido a que algunos de ellos se encuentran fuera del rango común para una arcilla típica. Además, cabe mencionar que la ubicación se encuentra a 2 km, como se ha comentado anteriormente.

Los datos obtenidos de los estudios geotécnicos se han renombrado de la siguiente manera:

- Terreno compactado (Calicatas) primera campaña: CC()
- Terreno natural (Sondeos) primer campaña: SC()
- Terreno compactado (Calicatas) segunda campaña: CE
- Terreno natural (Sondeos) segunda campaña: SE
- Terreno compactado (Calicatas) a 2 Km: CCN
- Terreno natural (Sondeos) a 2 Km: SCN

Los ensayos realizados se han dividido en dos grandes bloques según se trate de terreno natural o terreno compactado. El material proveniente del terreno compactado sufre una mayor deformación debido a su proceso de extracción, lo que resulta en muestras alteradas utilizadas finalmente en la formación de la balsa. Por otro lado, el terreno natural se refiere a aquel donde se extraen muestras inalteradas, y por lo tanto, estos parámetros se utilizan para definir el terreno en el cual se va a asentar la balsa.

3.1.1 Trabajos realizados

Para el reconocimiento geotécnico de la proyección de la Balsa, se han realizado nueve (9) sondeos con una profundidad máxima de 30 m, incluyendo ensayos geomecánicos. De estos sondeos, cinco (5) se han llevado a cabo a una distancia de 2 km de la ubicación de la balsa, como se mencionó anteriormente. Además, se han realizado doce (12) calicatas, de las cuales se ha obtenido información únicamente de ocho (8).

Es importante tener en cuenta que los datos obtenidos en la campaña de 2005 se han utilizado para refinar la solución, dado que provienen de una zona muy cercana al área de estudio, con una separación de solo 2 km.

A continuación, se muestra la ubicación de los ensayos realizados para ambas campañas, destacando únicamente aquellos ubicados en la zona de estudio:

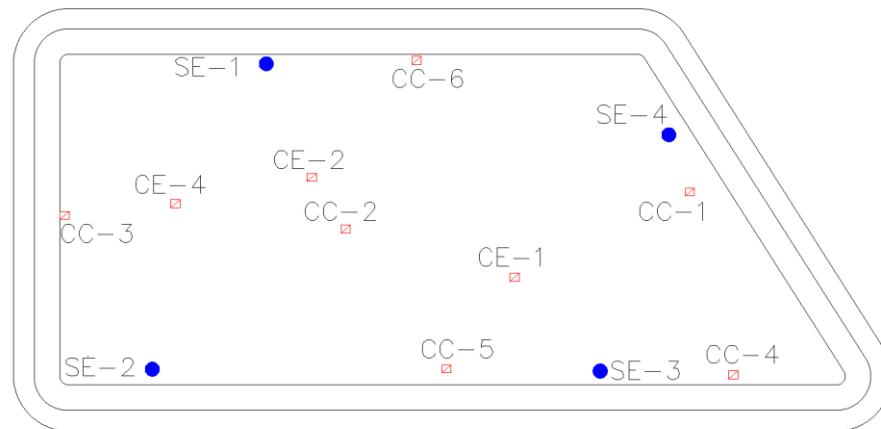


Figura 3-1. Ubicación de sondeos y calicatas en la balsa.

3.1.2 Parámetros de las arcillas ocre con bivalvos (Terreno natural)

A modo de resumen se ha implementado a continuación los datos obtenidos por los sondeos de las Arcillas ocre con bivalvos.

Estrato	Formato	Cota (-m)	Numero de golpes de ensayos SPT	Porcentaje de Finos por tamiz 0,008 mm	Limite Liquido (LL)	Limite Plastico (LP)	Indice Plastico (IP)	Clasificación de Casa Grande (USCS)	Humedad (%)
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-2.3	12,0-12,6	15	99,4	64,9	26,09	38,82	CH	24,71
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-3.3	15,0-15,6	32	38,2				SM	13,02
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-4.3	7,0-7,6	11	97,6	59,85	24,53	35,32	CH	25,33
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-1.3	28,0-28,6	56	40,9				SM	23,8
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-2.2	13,2-13,8	33	97,3	50,2	29	21,2	MH	24,1
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-3.3	29,6-30	R	36				SM	5,9
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-4.2	17,5-18,10	18	98,8	56,1	23,1	23,7	MH	30,6
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-5.2	13,2-13,6	34	96,8	47,8	24,2	23,6	CL	14,5
Estrato	Formato	Densidad aparente (g/cm3)	Densidad seca (g/cm3)	Resistencia a compresión simple (Kpa)	Resistencia al corte sin drenaje a partir de Qu	Resistencia al corte sin drenaje por corte directo Cu	Cohesion C' (Kpa)	Angulo de rozamiento drenado Ø'	Densidad de las partículas sólidas (gr/cm3)
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-2.3	2	1,65	425	213	44			2,35
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-3.3	2,2	1,95	507	253		19	36,95	2,45
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SE-4.3	2,03	1,62	231	115				2,44
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-1.3	1,96	1,58		0		6	40,8	2,34
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-2.2	1,98	1,6	520	260				2,36
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-3.3	1,6	1,51		0				1,69
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-4.2	1,9	1,45		0		25	18,3	2,35
Arcilla arenosa gris y algo beige con bivalvos	SCN-5.2	1,7	1,48	405	203				1,92

Figura 3-2. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno natural de las arcillas ocre con bivalvos.

3.1.3 Parámetros para la cimentación de la balsa compuesto por arcilla marrón plástica. (Terreno natural)

Como mencioné antes, vamos a tener dos campañas de sondeo distintas: una llevada a cabo en el año 2015 y la otra en el año 2018, donde podemos distinguir dos tipos de terrenos. Los datos han sido recopilados extrayendo la información de ambas campañas y resumiéndola en las tablas siguientes para facilitar la búsqueda de estos parámetros.

Estrato	Formato	Cota (-m)	Nº golpes ensayos SPT	% Finos pasa 0,008 mm	Limite Liquido	Limite Plastico	Indice Plastico	Clasificacion de Casa Grande	Humedad (%)
Arcilla marron plastica	SE-1.1	1,8-2,4	2	98,9	66,71	29,16	37,56	CH	42
Arcilla marron plastica	SE-1.2	3,0-3,6	0	99,3	52,49	21,56	30,93	CH	50
Arcilla marron plastica	SE-1.3	7,2-7,8	2	95	55,94	23,03	32,91	CH	54,3
Arcilla marron plastica	SE-2.1	1,8-2,4	1	99,5	65,55	25,25	40,3	CH	37,89
Arcilla marron plastica	SE-2.2	3,4-4,0	2	97,7	55,51	24,44	31,06	CH	46,99
Arcilla marron plastica	SE-3.1	1,5-2,1	3	99,5	67,91	24,3	43,62	CH	38,81
Arcilla marron plastica	SE-3.2	3,0-3,6	1	97,8	57,76	25,41	32,35	CH	49,23
Arcilla marron plastica	SE-4.1	1,5-2,10	1	99,6	69,45	51,21	18,24	MH	46,48
Arcilla marron plastica	SE-4.2	3,0-3,6	3	99,4	59,93	25	34,93	CH	53,16
Arcilla marron plastica	SCN-1.1	1,5-2,1	6	98,7	57,2	35,5	21,7	MH	39,5
Arcilla marron plastica	SCN-1.2	4,0-4,6	2	97,1	54,6	32,6	22	MH	48,7
Arcilla marron plastica	SCN-2.1	4,0-4,6	2	95,1	48,8	28,1	20,7	ML	47,5
Arcilla marron plastica	SCN-3.1	5,2-5,8	2	97,3	48,7	32,5	16,2	ML	49
Arcilla marron plastica	SCN-3.2	9,2-9,8	4	97,1	50,7	32,6	18,1	MH	47,2
Arcilla marron plastica	SCN-4.1	4,0-4,6	3	98,1	55,1	33,1	22	MH	50,4
Arcilla marron plastica	SCN-5.1	1,5-2,10	2	93,8	44,4	29	15,4	ML	38
Estrato	Formato	Densidad aparente (g/cm3)	Densidad seca (g/cm3)	Resistencia a compresion simple (Kpa)	Resistencia al corte sin drenaje a partir de Qu	Resistencia al corte sin drenaje por corte directo Cu	Cohesion C' (Kpa)	Angulo de rozamiento drenado Ø'	Densidad de las particulas solidas (gr/cm3)
Arcilla marron plastica	SE-1.1	1,7	1,22	56	28	-	8	22,62	-
Arcilla marron plastica	SE-1.2	1,7	1,15	25	13	7	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-1.3	1,79	1,16	16	8	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-2.1	1,83	1,33	66	33	8	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-2.2	1,8	1,3	83	42	-	16	20,5	-
Arcilla marron plastica	SE-3.1	1,79	1,29	113	56	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-3.2	1,93	1,29	60	30	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-4.1	1,77	1,21	54	27	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SE-4.2	1,73	1,15	31	16	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SCN-1.1	1,77	1,27	-	-	-	22	18,3	2,32
Arcilla marron plastica	SCN-1.2	1,68	1,13	-	-	-	-	-	-
Arcilla marron plastica	SCN-2.1	1,75	1,19	-	-	13	-	-	2,31
Arcilla marron plastica	SCN-3.1	1,71	1,15	-	-	23	-	-	-
Arcilla marron plastica	SCN-3.2	1,73	1,18	-	-	-	-	-	2,29
Arcilla marron plastica	SCN-4.1	1,7	1,13	-	-	-	21	18,8	-
Arcilla marron plastica	SCN-5.1	2,09	1,51	-	-	-	19	14,9	-

Figura 3-3. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno natural de las arcillas marrones plásticas.

3.1.4 Parámetros para el cuerpo de la balsa compuesto por arcilla marrón plástica. (Terreno Compactado)

Lo mismo ha ocurrido para la búsqueda de datos del terreno compactado conformado por la arcilla marrón plástica, es decir, se ha sintetizado toda la información en una tabla como la siguiente en función de la campaña geotécnica.

Formato	Cota (-m)	%Finos pasa 0,008 mm	Limite Liquido	Limite Plastico	Indice Plastico	Clasificacion de Casa Grande	Humedad (%)	Densidad aparente (g/cm3)	Densidad seca (g/cm3)	Resistencia al corte sin drenaje (Kpa)	Cohesion (Kpa)	Angulo de rozamiento drenado Ø'	Densidad de las particulas solidas (gr/cm3)
CE-1	0,40-0,60	99,7	63,12	25,85	37,27	CH	33	1,8	1,36	17	16	23,2	-
CE-2	1,10-1,50	84,7	63,49	29,2	34,3	CH	28	1,78	1,38	23	13	25,56	-
CE-3	1,10-1,50	99,7	63,2	29,56	33,64	CH	30	1,82	1,4	7	35	12,32	-
CE-4.1	2,8-3,0	99,4	54,18	23,92	30,26	CH	-	-	-	-	-	-	-
CE-4.2	0,4-0,6	-	-	-	-	CH	25	1,83	1,43	22	1	26,16	-
CC-1.1	0,6	99,6	56,5	31,7	24,8	CH	-	-	-	82	-	-	-
CC-1.2	1,0	99,3	60,1	32,8	27,3	CH	33,2	-	1,4	-	-	-	2,61
CC-4	0,5	99,4	58,2	31,9	26,3	CH	-	-	-	-	-	-	-
CC-5.1	0,5	99,8	56,8	31,7	25,1	CH	-	-	-	59	-	-	-
CC-5.2	1,0	99,6	62,1	33,2	28,9	CH	-	-	-	68	-	-	-
CC-5.3	1,2	99,6	62,1	33	29,1	CH	33,2	-	1,39	39	-	-	2,7
CC-5.4	2,0	99,7	66,4	32,4	34	CH	-	-	-	64	-	-	-
CC-6	1,0	99,8	64,4	33,7	30,7	CH	41,2	-	1,27	-	-	-	2,61
CCN-1	4,6	99,5	45,5	21,9	23,6	CL	23,3	1,63	-	53	-	-	-
CCN-2	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CCN-3	4,6	99	60	29,3	30,7	CH	21,2	1,57	-	53	-	-	-
CCN-4	4,6	99,1	51,1	30,3	20,8	MH	19,8	1,6	-	51	-	-	-

Figura 3-4. Cuadro de datos geotécnicos para el terreno compactado.

3.1.5 Niveles geotécnicos

Hasta la profundidad reconocida y de techo a muro podemos reconocer tres (3) unidades o niveles geotécnicos, fundamentalmente a sus propiedades geomecánicas y al reconocimiento realizado en la zona.

- Nivel geotécnico 1: Suelo vegetal
- Nivel geotécnico 2: Arcillas marrones plásticas con intercalaciones de fangos
- Nivel geotécnico 3: Arcillas ocre con bivalvos

3.1.5.1 Terreno Natural

Nivel geotécnico N°1: Suelo Vegetal

Cobertera vegetal formada por limos arenosos con láminas de sales precipitadas en superficie y abundantes grietas de desecación. En algunos puntos de la parcela se detectan paquetes de gravilla.

Localización y espesores: Detallamos a continuación los espesores determinados de los ensayos geotécnicos realizados:

Tabla 3–1. Espesor del terreno natural en el estrato suelo vegetal

Sondeo	Espesor (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
SCN-1	1,50	0,00	-1,50
SCN-2	0,60	0,00	-0,60
SCN-3	1,60	0,00	-1,60
SCN-4	0,90	0,00	-0,90
SCN-5	1,50	0,00	-1,50
SE-1	0,4	0,00	-0,4
SE-2	0,15	0,00	-0,15
SE-3	0,05	0,00	-0,05
SE-4	0,10	0,00	-0,10

El estrato de tierra vegetal tiene su nivel máximo en la zona norte y va disminuyendo hasta la zona sur de la parcela con espesores que van desde el entorno del metro hasta 0,05 m. Debido al escaso interés geotécnico no se han realizado ensayos a este nivel.

También hay que destacar que en la última campaña geotécnica la tierra vegetal ha quedado mejor nivelada por los labores de cultivos, desapareciendo grandes cantidades de tierra vegetal en la zona norte.

Nivel geotécnico N°2: Arcillas marrones plásticas.

Nivel formado por arcillas y limos marrones de plasticidad media-alta con pequeñas conchas dispersas y tonalidades grisáceas, de consistencia muy blanda con estratos fangosos intercalados a partir de la cota -3,00 m. Dicho fango se ha tenido en cuenta en el parámetro de la cohesión haciendo que su ajuste sea un poco más desfavorable ya que es un parámetro fundamental para el cálculo de la balsa. A muro del estrato aparecen arenas gruesas marrones, sin cohesión y con golpes elevados del SPTs. Su potencia, se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3–2. Espesor del terreno natural en las arcillas marrones plásticas

Sondeo	Espesor (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
SCN-1	7,30	-1,50	-8,80
SCN-2	10,00	-0,60	-10,60
SCN-3	10,00	-1,60	-11,60
SCN-4	9,50	-0,90	-10,40
SCN-5	7,10	-1,50	-8,60
SE-1	11,20	-0,40	-11,60
SE-2	7,95	-0,15	-8,10
SE-3	6,95	-0,05	-7,10
SE-4	6,90	-0,10	-7,00

Características geotécnicas-geomecánicas: Como se ha comentado con anterioridad la información para el presente informe se ha realizado a partir de dos campañas geotécnicas más otra colindante dando los valores que se muestran como resultado final.

Los parámetros geotécnicos de la muestra ensayada en este estrato son:

Tabla 3–3. Parámetros de identificación y estados del terreno natural en las arcilla marrones plásticas.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas marrones plásticas
Número medio de golpes en ensayos SPTs	2
Porcentaje que pasa por tamiz 0,08mm (%)	98
Límite Líquido (LL)	60
Límite Plástico (LP)	25
Índice Plástico (IP)	34
Humedad (%)	47
Clasificación de Casagrande	MH- CH
Espesor medio (m)	8,50

Tabla 3–4. Parámetro de resistencia del terreno natural en las arcilla marrones plásticas.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas marrones plásticas
Densidad aparente (g/cm ³)	1,7
Densidad seca (g/cm ³)	1,2
Resistencia a compresión simple (kPa)	50
Resistencia al corte sin drenaje Cu (kPa)	26
Cohesión (kPa)	10
Angulo de rozamiento drenado (°)	18
Módulo de deformación drenado (MPa)	5
Coefficiente de Poisson	0,3
Permeabilidad K (m/s)	1e-8
Índice de poros	0,8

Tras el análisis e interpretación de los resultados en ensayos in situ y de laboratorio los parámetros expuestos

anteriormente se han concluido debido a:

- Número medio de golpes en ensayos SPTs: En términos estadísticos, se ha elegido el valor 2 debido a que coincide con las medianas de ambos informes y también se encuentra dentro del rango de las medias. En resumen, al seleccionar 2, se ha considerado tanto la ubicación central como la dispersión de los datos, lo que sugiere que es un valor representativo y cercano a la realidad.
- Porcentaje que pasa por tamiz 0,08 mm (%): El 98 % representa un punto intermedio entre dos medidas estadísticas importantes: la mediana y la media.
- Limite líquido (LL): De los datos reflejados en el primer informe, se ha tomado la decisión de eliminar los valores que se encuentran por debajo del límite líquido de 50. Esta elección tiene como objetivo facilitar la diferenciación entre alta y baja plasticidad en el suelo. Como resultado, se ha establecido un modelo más restrictivo para el cálculo, lo que implica que solo se considerarán los valores que superan dicho límite.
- Limite Plástico (LP): En términos técnicos, el valor de 25 se ha seleccionado basándonos en la mediana del segundo informe, que corresponde a la zona de estudio. La razón detrás de esta elección es que el primer informe se refiere a una parcela colindante, por lo que hemos optado por un valor más relacionado con el segundo informe. Es importante destacar que hemos omitido el valor de 55,21 del segundo informe debido a que introduce una dispersión significativa en los datos.
- Índice de plasticidad (IP): En términos técnicos, el valor de 18,24 del segundo informe ha sido descartado, dando como resultado el valor 34. Esta elección se basa en que el 34 se encuentra como un punto intermedio entre la media y la mediana del segundo informe. Al seleccionar el 34, se ha considerado tanto la ubicación central como la variabilidad de los datos, lo que lo convierte en un valor representativo para el análisis.
- Humedad: Valor correspondiente de las medianas de ambos informes.
- Clasificación de Casagrande (USCS): Los materiales encontrados en su mayoría a lo largo de las dos campañas son CH-MH.
- Densidad aparente: El valor seleccionado de $1,7 \text{ g/cm}^3$ fue elegido debido a que se encuentra dentro del rango promedio de los datos de ambos informes.
- Densidad seca: En el segundo informe, se han acotado los valores al rechazar aquellos mayores de $1,3 \text{ g/cm}^3$. Estos valores atípicos tienden a desviar la media. De manera similar, en el primer informe, se ha descartado el valor de $1,51 \text{ g/cm}^3$ que también afecta la media.
- Resistencia a compresión simple (qu): El valor de 50 kPa se encuentra entre la media y la mediana del segundo informe. Esto es relevante porque el primer informe no proporciona datos para este parámetro. En este caso, el valor de 50 kPa cae dentro de ese rango, lo que sugiere cierta consistencia en los resultados del segundo informe.
- Resistencia al corte sin drenaje (cu): se ha descartado la información obtenida mediante corte directo para el valor de cu. En su lugar, se han empleado los datos derivados de la operación $qu/2$. Esto ha dado como resultado un valor que se encuentra entre la media y la mediana del segundo informe. Es relevante señalar que el primer informe carece de datos para este estrato.
- Coeficiente de Poisson, permeabilidad, ángulo de rozamiento, cohesión y módulo de deformación drenado: Los valores del coeficiente de Poisson, permeabilidad, ángulo de rozamiento, cohesión y módulo de deformación drenado se han tomado gracias a la Tabla 2.4.3.f facilitada por la ROM, ya que a través de los estudios geotécnicos hemos podido clasificar dicho estrato como un suelo cohesivo con limos de granulometría uniforme con algo de arena y arcilla con una consistencia blanda o muy blanda.

Ha habido mayor confianza en los datos de la segunda campaña ya que nos aportan mayor seguridad, debido a que la primera campaña se encuentra a 2 km y no corresponde donde finalmente se realizara la balsa. Por ese motivo siempre se ha escogido datos con mayor semejanza a la segunda campaña.

	Tipo de suelos	Consistencia	Índice de poros ⁽²⁾	Resis. al corte sin drenaje ⁽⁶⁾ (kPa)	Resistencia con drenaje C(kPa) ⁽⁵⁾ (ϕ^0)	Módulo de deformación ⁽⁵⁾ drenado (MPa)	Coefficiente de permeabilidad ⁽³⁾ (cm/s)
Suelos cohesivos	Limos de granulometría uniforme con algo de arena y arcilla	Dura o firme	0,40	100	50	30	40
		Media	0,60	60	20	25	15
		Blanda	0,80	20	10	20	7
		Muy blanda	I	10	0	18	2
	Arcilla y limos arcillosos. Pueden contener gravas y/o arenas en proporciones menores del 70%	Dura o firme	0,35	>100	50	28	50
		Media	0,50	80	20	23	20
		Blanda	0,70	40	10	19	5
		Muy blanda	I	20	0	15	1

Figura 3-5. Tabla 2.4.3 ROM(Soriano Peña, 2005) .

Nivel geotécnico N°3: Acillas arenosas ocre con bivalvos.

Nivel formado por arcilla y limos de plasticidad media-alta, de consistencia muy blanda. Presentan pequeñas conchas y tonalidades grisáceas.

Tabla 3–5. Dimensiones del terreno natural en las arcillas ocre con bivalvos

Sondeo	Espesor (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
SCN-1	22,80	-8,80	-31,60
SCN-2	13,10	-10,60	-23,70
SCN-3	18,40	-11,60	-30,00
SCN-4	14,30	-10,40	-24,70
SCN-5	12,00	-8,60	-20,60
SE-1	26,60	-11,60	-15,00
SE-2	6,90	-8,10	-15,00
SE-3	8,95	-7,10	-16,05
SE-4	8,00	-7,00	-15,00

Características geotécnicas-geomecánicas: Los parámetros son obtenidos por dos campañas geotécnicas más otra colindante dando los valores que se muestran como resultado final.

Destacar que nos encontramos en un entorno de marismas, por lo tanto, nos vamos a encontrar distintos niveles de estratos provocados por formaciones aluviales anteriores, dando como resultado el estrato de arcillas ocre con algo de beige intercalando distintos estratos aluviales. Dependiendo de la cota a la que se haya extraído el testigo de sondeo vamos a tener un parámetro más arenoso o arcilloso promovido por esos niveles aluviales. Aunque a través del análisis de todos los datos se ha llegado a la conclusión que estamos en un entorno arcilloso, ya que las propiedades que predominan en los ensayos son arcillosas.

Los parámetros geotécnicos de la muestra ensayada en este estrato son:

Tabla 3–6. Parámetros de identificación y estados del terreno natural en las arcillas ocreas con bivalvos.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas ocreas con bivalvos
Número medio de golpes en ensayos SPTs	25
Porcentaje que pasa por tamiz 0,08mm (%)	98
Límite Líquido (LL)	55
Límite Plástico (LP)	25
Índice Plástico (IP)	30
Humedad (%)	22
Clasificación de Casagrande	CH
Espesor medio (m)	15

Tabla 3–7. Parámetro de resistencia del terreno natural en las arcillas ocreas con bivalvos.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas ocreas con bivalvos
Densidad aparente (g/cm ³)	1,9
Densidad seca (g/cm ³)	1,55
Resistencia a compresión simple (kPa)	200
Resistencia al corte sin drenaje Cu (kPa)	100
Cohesión (kPa)	20
Angulo de rozamiento drenado (°)	23
Módulo de deformación drenado (MPa)	20
Coefficiente de Poisson	0,3
Permeabilidad K (m/s)	1e-10

Tras el análisis e interpretación de los resultados en ensayos in situ y de laboratorio los parámetros expuestos anteriormente se han concluido debido a:

- Número medio de golpes en ensayos de SPTs: Se ha optado el valor de 25 ya que es un valor intermedio entre la media y mediana de ambos informes.
- Porcentaje que pasa por tamiz 0,08 mm (%): se han excluido los valores del 40,9% y 36% del primer informe, así como el valor del 38,2% del segundo informe. Esta exclusión se realizó con el objetivo de ajustar con mayor precisión el resultado final que se muestra. Al eliminar estos valores atípicos, se obtiene una estimación más robusta y representativa para el análisis.
- Límite Líquido (LL): el valor se encuentra dentro del rango comprendido entre la media y la mediana de ambos informes. Esta elección permite considerar tanto la tendencia central como la resistencia a valores extremos al tomar decisiones basadas en datos.
- Límite Plástico (LP): el valor 25 se atribuye a la mediana del segundo informe, aunque también concuerda con los valores de media y mediana del primero.
- Índice de Plasticidad (IP): Se ha optado por la media entre ambos informes dando lugar un valor de 30.
- Humedad: se han excluido los valores del 5,9% y 30,6% del primer informe. Esto ha permitido ajustar con mayor precisión el valor resultante, que se sitúa en un promedio del 22% entre ambos informes. Al eliminar estos valores atípicos, se obtiene una estimación más robusta y representativa para el análisis.
- Clasificación de Casagrande (USCS): Los materiales encontrados en su mayoría a lo largo de las dos campañas son SM-CH.
- Densidad aparente: El valor presente se ha obtenido de la media entre ambos informes.

- Densidad seca: se ha excluido el valor de 1,95 g/cm³ del segundo informe. Este ajuste se realizó con el objetivo de obtener un valor más preciso, que se sitúa en un promedio de 1,55 g/cm³ entre ambos informes. Al eliminar este valor atípico, se obtiene una estimación más robusta y representativa para el análisis.
- Resistencia a compresión simple (qu): Es el valor más bajo de los obtenidos por los ensayos tanto por debajo de la media como de la mediana, haciendo que nos encontremos por el lado de la seguridad.
- Resistencia al corte sin drenaje (cu): Valor ofrecido por la tabla 2.4.3 de la ROM donde hemos podido clasificar el suelo según los informes geotécnicos como: un suelo cohesivo de arcilla y limos que contienen algo de arenas y gravas en porciones menores al 70%, con una consistencia dura o media.
- Cohesión (c): se ha excluido el valor de 5,88 kPa del primer informe. Esto ha permitido ajustar con mayor precisión el valor resultante, que se sitúa en un promedio de aproximadamente 20 kPa entre ambos informes. Al eliminar este valor atípico, se obtiene una estimación más robusta y representativa para el análisis.
- Angulo de rozamiento drenado (°): Se ha tomado como referencia directamente la tabla extraída de la ROM ya que el valor que da según los ensayos es de 40°, por lo tanto, estaríamos hablando de una arena, por consiguiente y analizando los demás datos se ha optado por un valor de 23° al igual que aparece en la Tabla 2.4.3 extraída de la ROM.
- Coeficiente de Poisson, permeabilidad y módulo de deformación drenado: Como pasaba en el anterior estrato los valores del coeficiente de Poisson, permeabilidad y módulo de deformación drenado se han tomado gracias a la tabla facilitada por la ROM que a través de otros datos definidos por los estudios geotécnicos como la cohesión y el ángulo de rozamiento se ha podido definir mejor el tipo de materia en el que nos encontramos. La tabla que se nombra es la misma a la del ángulo de rozamiento (Tabla 2.4.3).

Como se comentó en el estrato anterior ha habido mayor confianza en los datos de la segunda campaña ya que nos aportan mayor seguridad, debido a que la primera campaña se encuentra a 2 km y no corresponde donde finalmente se realizara la balsa. Por ese motivo siempre se ha escogido datos con mayor semejanza a la segunda campaña.

3.1.5.2 Caracterización del terraplén compactado

En el presente punto se describirá las propiedades del terreno obtenidas de las calicatas para el desarrollo del terraplén que conformará el dique. Para ello se ha descrito los espesores del estrato y los parámetros de identificación y resistencia.

Nivel geotécnico 1: Suelo Vegetal

Tabla 3–8. Espesores y cotas del terreno compactado en el suelo vegetal

Sondeo	Espesor (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
CCN-1	0,50	0,00	-1,50
CCN-2	0,80	0,00	-0,80
CCN-3	1,00	0,00	-1,00
CCN-4	0,80	0,00	-0,80
CCN-5	0,80	0,00	-0,80
CE-1	0,25	0,00	-0,25
CE-2	0,25	0,00	-0,25
CE-3	0,30	0,00	-0,30
CE-4	0,25	0,00	-0,25
CC-1	0,60	0,00	-0,60
CC-2	0,60	0,00	-0,60
CC-3	0,40	0,00	-0,40

CC-4	0,40	0,00	-0,40
CC-5	0,85	0,00	-0,85
CC-6	0,60	0,00	-0,60

Nivel geotécnico 2: Arcillas marrones plásticas

Tabla 3–9. Espesores y cotas del terreno compactado en las arcillas marrones plásticas

Sondeo	Espesor (m)	Cota superior (m)	Cota inferior (m)
CCN-1	3,10	-1,50	-4,60
CCN-2	4,20	-0,80	-5,00
CCN-3	3,60	-1,00	-4,60
CCN-4	3,80	-0,80	-4,60
CCN-5	3,80	-0,80	-4,60
CE-1	1,75	-0,25	-2,00
CE-2	2,25	-0,25	-2,50
CE-3	2,20	-0,30	-2,50
CE-4	2,95	-0,25	-3,20
CC-1	1,60	-0,60	-2,20
CC-2	1,60	-0,60	-2,20
CC-3	2,10	-0,40	-2,50
CC-4	2,00	-0,40	-2,40
CC-5	1,95	-0,85	-2,80
CC-6	1,60	-0,60	-2,20

Características geotécnicas-geomecánicas: Los parámetros son obtenidos por dos campañas geotécnicas más otra colindante dando los valores que se muestran como resultado final.

Los parámetros geotécnicos de la muestra ensayada en este estrato son:

Tabla 3–10. Parámetros de identificación y estados del terreno compactado en las arcillas marrones plásticas.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas marrones plásticas
Porcentaje que pasa por tamiz 0,08mm (%)	99
Límite Líquido (LL)	60
Límite Plástico (LP)	30
Índice Plástico (IP)	30
Humedad (%)	30
Clasificación de Casagrande	CH
Espesor medio (m)	2

Tabla 3–11. Parámetro de resistencia terreno compactado en las arcillas marrones plásticas.

Parámetros geotécnicos	Valores de las arcillas marrones plásticas
Densidad aparente (g/cm ³)	1,80
Densidad seca (g/cm ³)	1,4
Resistencia al corte sin drenaje Cu (kPa)	43
Cohesión (kPa)	15
Angulo de rozamiento drenado (°)	20
Módulo de deformación drenado (MPa)	10
Coefficiente de Poisson	0,30

Tras el análisis e interpretación de los resultados en ensayos in situ y de laboratorio los parámetros expuestos anteriormente se han concluido debido a:

- Porcentaje que pasa por tamiz 0,08 mm (%): El valor de 84,7% del último informe ha sido eliminado debido a que introduce una dispersión significativa en el resultado final. Este ajuste asegura que los resultados finales sean más representativos de la tendencia central de los datos.
- Limite Liquido (LL): Se ha suprimido el valor de 45,5 y 66,4 de ambas campañas para dar lugar a un cálculo denominado outliers y con los demás datos restantes se ha obtenido una media dando como resultado el valor expuesto en la tabla superior.
- Limite Plástico (LP): Se ha suprimido el valor de 21,9 y 33,7 de ambas campañas para dar lugar a un cálculo denominado outliers y con los demás datos restantes se ha obtenido una media dando como resultado el valor de 30 aproximadamente.
- Índice de Plasticidad (IP): Se ha optado por despreciar el valor de 23,6 y 20,8 ya que los valores restantes todos están por encima de 25. Dichos valores han sido extraídos de la primera campaña, ya que es una campaña ejecutada a 2 Km y dispersa en gran medida la solución.
- Humedad: Se ha prescindido de todos los valores de la primera campaña de 2005 ya que difiere mucho de la campaña posterior y se ha obtenido a través de la media de la segunda campaña.
- Clasificación de Casagrande (USCS): Los materiales encontrados en su mayoría a lo largo de las dos campañas son CH.
- Densidad aparente: Valor medio escogido del segundo informe ya que no se deposita mucha confianza en el primer informe.
- Densidad seca: El valor medio aproximado de 1,4 g/cm³ se obtuvo a partir de los datos de ambas campañas.
- Resistencia al corte sin drenaje (cu): Se ha excluido el valor de 82,37 KPa de la primera campaña debido a que es el valor más alejado de la moda y la media. El resultado final se ha obtenido calculando la media de los datos restantes.
- Cohesión (c): Se ha establecido una cohesión de 15 KPa mediante la eliminación de valores extremos tanto en el extremo superior como en el inferior. Específicamente, se han descartado valores como 35,5 KPa y 0,98 KPa debido a su distancia significativa de la media y la moda. Es importante destacar que la información para este parámetro solo está disponible a través de la segunda campaña. Este ajuste asegura que los resultados finales sean más representativos de la tendencia central de los datos.
- Angulo de rozamiento (°): Se seleccionó un valor de 20 ya que el valor de 10,89° de la campaña de la parcela colindante no se ha considerado debido a que introduce una dispersión significativa en los datos.

- Coeficiente de Poisson y Permeabilidad: El coeficiente de Poisson y la permeabilidad se han tomado gracias a la tabla facilitada por la ROM que a través de otros datos definidos por los estudios geotécnicos como la cohesión y el ángulo de rozamiento se ha podido definir mejor el tipo de materia en el que nos encontramos. La tabla que se nombra es la misma que para la del ángulo de rozamiento Tabla 2.4.3.

3.2 Sismo

La norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 tiene como objetivo proporcionar criterios que han de seguirse dentro del territorio español para la consideración de la acción sísmica en el proyecto, construcción, reformas y conservación.

Esta norma es de aplicación ya sea aplicación de nuevo proyecto o reformas de proyectos ya existentes, con el fin de que los niveles de seguridad de los elementos afectados sean superiores a los que poseían en su concepción original.

A efectos de la Norma podemos clasificar según los daños que se ocasionen e independientemente del tipo de obra de que se trate en importancia moderada, normal o especial.

Se concluye que se trata de una construcción de una importancia moderada debido a que tiene con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a tercero.

La importancia de la peligrosidad sísmica del territorio nacional se define a través del mapa siguiente.

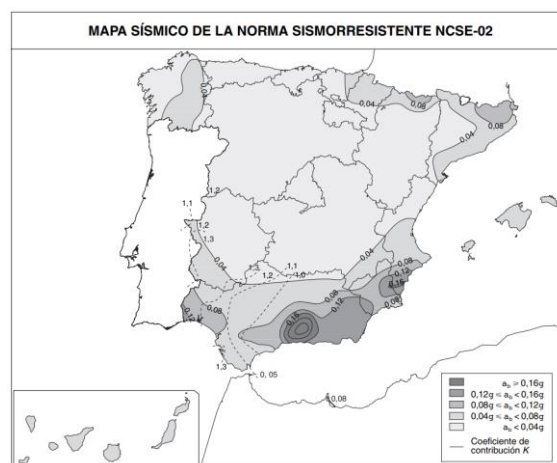


Figura 3-6. Mapa sísmico de la norma sismorresistente NCSE-02 (Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación & Ministerio de fomento, s. f.).

La zona de estudio se encuentra entre los municipios de Isla Mayor y Villamanrique de la Condesa, dicho mapa expresa en relación al valor de la gravedad, g , la aceleración sísmica básica, y el coeficiente de contribución, k , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.

También la aceleración básica puede ser obtenida de manera más precisa a través de la tabla en el Anejo 1 de la norma.

Para concluir la aceleración de cálculo se divide en dos direcciones vertical y horizontal. Para el cálculo de la aceleración horizontal se expresa a continuación a través de una ecuación con tres parámetros: aceleración básica, coeficiente según la importancia de la construcción y coeficiente de ampliación del terreno, mientras que para la aceleración de cálculo vertical se expresa como el 70% de la aceleración de cálculo horizontal según NCSE-02.

La aceleración sísmica de cálculo, a_c , se define como el producto:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Donde:

Tabla 3–12. Datos para la aceleración de cálculo

Aceleración sísmica básica (A_b)	0,08g
Construcción de importancia normal (ρ)	1
Aceleración de cálculo horizontal	0,1g
Aceleración de cálculo vertical	0,07g

3.3 Expansividad

Los materiales que conforman el subsuelo son principalmente arcillas y limos de plasticidad media. Por ello se ha realizado 3 ensayos para la determinación cualitativa de la expansividad, ensayo de Lambe, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3–13. Determinación de expansividad a partir de ensayos.

Muestra	Índice de expansión	Cambio potencial de volumen	Expansividad
SCN-1 1,50-2,10	95	MARGINAL	BAJA-MEDIA
SCN-1 4,00-4,60	73	NO CRITICO	BAJA
SCN-4 17,50-18,10	92	MARGINAL	BAJA-MEDIA

Según la bibliografía consultada (Ingeniería geológica de Luis González de Vallejo) la expansividad del material se puede clasificar como:

Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos						
Grado	Expansividad	Finos (%)	Límite líquido	Índice Lambe (kPa)	Presión de hinchamiento (kPa)	Hinchamiento libre (%)
I	Baja	< 30	< 35	< 80	< 25	< 1
II	Baja a media	30-60	35-50	80-150	25-125	1-4
III	Media a alta	60-95	50-65	150-230	125-300	4-10
IV	Muy alta	> 95	> 65	> 230	> 300	> 10

Figura 3-7. Tabla expansividad libro Luis González Vallejo.

A modo de conclusión, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por los ensayos de laboratorio, los materiales que conforman el subsuelo estudiado no son susceptibles de experimentar cambios de volumen significativos con las variaciones en sus contenidos en humedad.

No obstante, se aconseja controlar la humedad bajo el apoyo de los cimientos y en los diques debido al contenido elevado de finos con lo cual se va a formar un sistema de drenaje utilizando zahorra drenante, tuberías y geotextil.

3.4 Agresividad química del suelo

También se han realizado ensayos para determinar el contenido en sulfatos solubles a los materiales detectados en los sondeos y calicatas:

Tabla 3–14. Agresividad química del suelo

Prospección	Muestra	Profundidad	Contenido en sulfato solubles
CCN-1	Suelo	0,80-4,60	2481,1 mg/kg
CCN-3		1,00-5,00	2099,5 mg/kg
SCN-3		1,50-2,10	1611,0 mg/kg
SCN-4		1,50-2,10	1232,33 mg/kg

Tabla 3–15. Agresividad química del agua

Sondeo	Muestra	Cota (m)	Contenido en sulfatos solubles	Contenido en cloruros	PH
SCN-3	Agua	-2,60	2820,2 mg/l	13,4 g/l	6,6
SCN-5	Agua	-7,00	674,3 mg/l	14,8 g/l	6,5

A modo de conclusión conforme a la agresividad química del suelo, no supone un riesgo notorio para la estructura ya que se va a utilizar elementos de impermeabilización y drenaje para que el agua no este en contacto directo con el terreno y evitar que las disoluciones de las sales conformen asientos y pérdidas de resistencia.

3.5 Nivel freático

El nivel freático puede sufrir variaciones debido a las condiciones hidrológicas de la zona, aportes y/o extracciones artificiales, etc. Por ello, es aconsejable tomar medidas del mismo antes del comienzo de las obras.

Las medidas tomadas del nivel piezométrico son las siguientes:

Tabla 3–16. Cotas del nivel freático.

Prospección	Cota del Nivel freático (m)
SCN-1	-6,50
SCN-2	-8,00
SCN-3	-4,00
SCN-4	-6,00
SCN-5	-8,50
SE-1	-12,30
SE-2	-11,20
SE-3	-5,50
SE-4	-14,80

En conclusión, el valor obtenido para el cálculo del nivel freático es de una cota de -3 metros. Aunque la cota más baja ha sido -4 se ha disminuido más, ya que estamos en una zona de marismas y el terreno en la mayoría de las ocasiones estará muy humedecido, provocando la inestabilidad de la estructura. De esta manera al llevar al agua lo más cerca posible de la estructura hacemos que el cálculo de unas soluciones en los casos más desfavorables posibles y por lo tanto más seguros.

Conclusión

Se proyecta la ejecución de una balsa mixta (Excavación-terraplén) para riego. Los materiales extraídos de excavación se utilizan para los terraplenes.

Como los materiales que componen los terraplenes serán de limos y arcillas por lo tanto tendrán un limitado uso, debido al contenido de sulfatos y porcentaje de finos, por lo que se dispondrán de drenajes naturales y artificiales.

No se consideran los materiales de los terraplenes expansivos, pero si se debe tomar medidas para que no penetren las aguas del embalse y de escorrentía haciendo que varíen sus condiciones de humedad.

En consecuencia, se tomarán medidas como drenes y impermeabilización del vaso.

4 CÁLCULO DE LA Balsa

4.1 Bases de cálculo

En esta sección se caracterizará la tipología, cotas y dimensiones del dique con el objetivo de establecer un perfil con dimensiones iniciales, las cuales podrán modificarse para optimizar el uso de materiales a medida que se utilicen los softwares pertinentes.

Antes de proceder con el predimensionamiento de la balsa, se ha investigado sobre el diseño utilizado en estas estructuras, basándose en el "Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas". Dicho manual establece los elementos más importantes a considerar, como la cimentación del dique de cierre, el propio dique de cierre y el vaso de la balsa.

En cuanto a las cimentaciones de la balsa, se ha empleado el mismo material del primer estrato, arcilla marrón plástica, garantizando tanto la estabilidad como la estanqueidad. Para la estanqueidad, se ha utilizado zahorra drenante con tubería en forma de espina de pez en el fondo de la balsa, recubierta con geotextil tanto en la cimentación como en las paredes del vaso. Para aportar resistencia, se ha optado por realizar la construcción en dos fases, dividiendo el dique en dos partes iguales unidas a través del geotextil para así proporcionar resistencia a tracción. Esta división en dos fases permite que disminuya el asentamiento final tras la construcción completa de la balsa, dado que se ha establecido una duración de un año entre fases, lo que aporta estabilidad a la cimentación.

Para el dique de cierre, se debe garantizar la estabilidad frente a las cargas por agua, las posibles presiones intersticiales y las acciones sísmicas. Esta estabilidad se ha logrado gracias a la utilización del geotextil, que permite que el material se vuelva impermeable y aporte resistencia.

En el caso del vaso de la balsa, es esencial asegurar la impermeabilidad y taludes adecuados para evitar deslizamientos. Según el manual de diseño de balsas, se recomienda para desmontes en suelo una relación de 3H:2V a 1H:2V, y para desmontes en roca, de 1H:1V a 1H:2V. No obstante, dado que se trata de un material blando, se ha optado por determinar el valor del talud a través de los ábacos de Taylor.

Para conocer la estabilidad y asegurar que la balsa es óptima para su uso nos hemos basado en factores de seguridad extraídos del propio manual de balsas como se puede apreciar en la siguiente imagen:

<i>SITUACIÓN DE DISEÑO</i>	<i>F. S.</i>
<i>Final de construcción</i>	<i>1,3</i>
<i>Embalse lleno</i>	<i>1,5</i>
<i>Rotura elemento impermeabilización</i>	<i>1,3</i>
<i>Sismo a embalse lleno</i>	<i>1,3</i>
<i>Desembalse rápido</i>	<i>1,1</i>

Figura 4-1. Coeficientes de seguridad del manual de balsas(Editorial: TyB editores & Ministerio de medioambiente, 2010) .

4.2 Predimensionamiento geométrico

La primera medida a considerar en el cálculo del dique es el equilibrio de tierras, ya que es esencial evitar el exceso de material. Las cotas consideradas para dicho cálculo son: la cota de coronación (+6,6 m) y la cota de lámina de agua (+5,1 m), de acuerdo con las necesidades para un uso efectivo. La fórmula utilizada para el equilibrio de tierras es la siguiente:

Área del trapecio

$$AREA = \frac{b + B}{2} \times h = \frac{4,8 + 71}{2} \times 6,6 = 251 \text{ m}^2$$

Volumen terraplén

$$V = 251 \times 3900 = 978900 \text{ m}^3$$

Área del terreno natural

$$A = 718621,354 \text{ m}^2$$

Volumen extraído

$$Ve = 1,50 \times 718621,354 = 1077932,031 \text{ m}^3$$

Se puede apreciar comparando que $V < Ve$, por lo tanto, que el equilibrio de volumen es apto.

Las tierras para la construcción del dique se ha excavado del vaso de la balsa, utilizando arcilla marrón con características plásticas para el cuerpo del dique. Primero se ha extraído la capa de tierra vegetal con una profundidad de 0,5 m, seguida de la extracción del resto de la arcilla marrón. En total, se realizará un desmonte de 2 metros en el vaso, de los cuales solo se aprovechan 1,5 metros de arcilla marrón para la balsa.

Existen dos tipos de datos: datos del terreno natural proveniente de los sondeos y datos del terreno compactado proveniente de las calicatas, utilizados para diferentes cálculos. Para este cálculo del dique, se debería tomar los datos del terreno compactado. Sin embargo, se ha observado que los datos del terreno natural son más realistas respecto a las condiciones del terreno, debido a que el método de extracción de muestras tiene mayor precisión. Como en este momento estamos realizando un precálculo se han tomado valores medios dentro de los datos extraídos del terreno natural.

Los datos obtenidos de los sondeos se han utilizado para calcular los taludes iniciales mediante los ábacos de Taylor, con $\phi = 0$ y datos iniciales como el peso específico, ángulo de rozamiento interno, cohesión y altura del dique. El resultado ha sido taludes de 1:5 en el trasdós y en el intradós. Los datos representados utilizados para el ábaco de Taylor han sido una aproximación con valores cercano a la media de los parámetros del terreno natural.

Tabla 4-1. Parámetros para el ábaco de Taylor.

Altura (H)	6,6 m
Peso específico del suelo	19 kN/m ³
Cohesión	15
Inclinación del talud	11°

$$D * H = 10m$$

$$D = 2,51 \text{ m}$$

$$N = \frac{\gamma * H}{C} = \frac{19 * 6,6}{15} = 8,36$$

$$\beta = 11^\circ$$

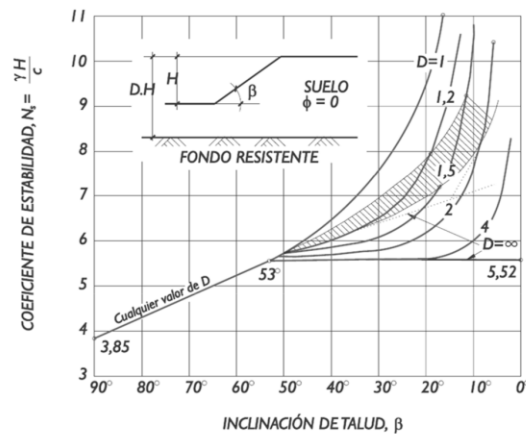


Figura 4-2. Ábaco de Taylor.

Centrándonos en la tipología del dique adoptado, se ha decantado por un dique impermeabilizado con geomembrana, dren y sin chimenea. Esta configuración se ha elegido debido a que la altura del dique es inferior a 10 metros y, según el manual, no es necesaria la inclusión de una chimenea en estas condiciones.

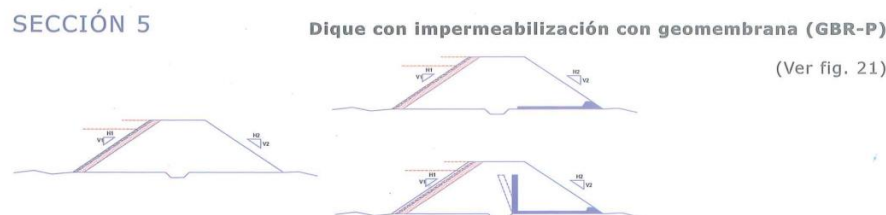


Figura 4-3. Dique impermeabilizado con geomembrana (Manual para el diseño construcción y explotación de mantenimiento de balsas).

No ha sido necesario el empleo de rastrillo en la base del dique, ya que las acciones del propio geotextil se han considerado suficientes para alcanzar el nivel de resistencia requerido y cumpliendo los factores de seguridad necesarios.

Para la anchura de coronación, se ha utilizado una fórmula extraída del manual, donde solo se necesita la altura de la balsa, resultando en una anchura de coronación de 5 metros, dado que la altura se ha redondeado a 10 metros. La fórmula es la siguiente:

$$\text{Coronación} = 3 + \frac{\text{Altura}}{5} = 5 \text{ m}$$

La pendiente de la coronación se ha establecido en un 2% hacia el exterior de la balsa, es decir, hacia los taludes exteriores. La anchura de la coronación es de 4,8 m, compuesta por una capa de 20 cm de espesor de zahorra artificial y una capa de 5 cm de mezcla bituminosa. El resguardo se ha fijado en 1,5 metros, superando el mínimo requerido por el manual, que es de 1 metro.

Referente al drenaje, se ha optado por un manto de drenaje formado por zahorra drenante, geotextil y tuberías de 20 cm de diámetro, separadas entre sí por 30 metros que como mínimo dista el manual, dividiendo la base de la balsa en cuatro pendientes que desembocan en las cuatro esquinas de la misma. Se ha seleccionado un geotextil tipo G-705-PP de la empresa Logrotex, que soporta una resistencia de 13,57 kN/m, cubriendo la base del vaso de la balsa y su cimentación, además de una capa adicional de geotextil a media altura de la balsa.

4.3 Cálculo de estabilidad.

4.3.1 Métodos de comprobación.

El análisis de la estabilidad global del dique y de cualquier talud afectado, en general, puede hacerse empleando los métodos habituales de cálculo de estabilidad de taludes en suelos, basados en la teoría de equilibrio límite.

Esta teoría establece el equilibrio de fuerzas y momentos actuantes en un sistema, aplicando exclusivamente las leyes de la estática, sin tener en cuenta las deformaciones del terreno y suponiendo que toda la masa movilizada se comporta como un sólido rígido.

A pesar de ser unos métodos más simplificados que los que tienen en cuenta las deformaciones, se utilizan mucho más dado que están ampliamente contrastados en la práctica, conociéndose bien sus grados de confianza. Entre ellos se puede citar los métodos de Morgenstern y Price, Spencer y Bishop.

Mientras que el método de elementos finitos (MEF) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales. El MEF se basa en la discretización del dominio a estudio en un número finito de elementos más pequeños unidos entre sí mediante puntos denominados nodos donde se resuelven las variables básicas del problema.

4.3.2 Comprobación por equilibrio límite (EL).

4.3.2.1 Software informático y modelización.

Para el desarrollo de la comprobación del equilibrio límite se ha utilizado un software denominado Geoestudio de la casa Seequent concretamente Seep para el cálculo con flujo de agua y Slope para el cálculo de la seguridad del talud, en el cual se han analizado varios modelos para observar el factor de seguridad final y ver si cumple y es apto, en el caso de que no lo sea averiguar qué medidas serían las más oportunas para dicha estabilidad.

Referente a la modelización se ha tomado cuatro modelos distintos según si estamos a corto o largo plazo y según el estudio del talud exterior o interior de la balsa, dando como resultado cuatro resultados de coeficiente de seguridad que deben cumplir los factores de seguridad del manual de balsa. Se han utilizado tres tipos de materiales en la balsa, talud de partida tanto interior como exterior de 1:5 y el nivel de lámina de agua a la cota de mas siete metros.

Los espesores establecidos de los estratos son:

- Estrato de arcilla marrón plástica con espesor de 8,5 metros.
- Estrato de arcilla beige con bivalvos con espesor de 13,5 metros.

En cuanto a la modelación del cálculo se ha utilizado cuadrículas de puntos y puntos de tangencia con particiones de diez elementos.

4.3.2.2 Parámetros geotécnicos.

Los parámetros geotécnicos que se han introducido en el software son los siguientes:

Tabla 4-2. Parámetros para la modelización del flujo en Geoestudio.

Elemento estructural	Material	Parámetros	Valores a corto plazo	Valores a largo plazo
Cimentación	Arcillas plásticas marrones	Compresibilidad	0,0002/kPa	0,0002/kPa
		Límite líquido	56%	56%
	Arcillas ocreas con bivalvos	Compresibilidad	0,0004/kPa	0,0004/kPa
		Límite líquido	40%	40%
Dique	Arcilla marrón plástica	Compresibilidad	0,0002/kPa	0,0002/kPa
		Límite líquido	60%	60%

Tabla 4-3. Parámetros introducidos en Geoestudio.

Elemento estructural	Material	Parámetros	Valores a corto plazo	Valores a largo plazo
Cimentación	Arcillas marrones plásticas	Peso unitario	17 Kn/m ³	17 Kn/m ³
		Cohesión	26	10
		Ángulo de rozamiento	0°	18°
		Permeabilidad (Método Fredlund-Xing-Huang)	1,8*10 ⁻⁹ m/seg	1,8*10 ⁻⁹ m/seg
		Diámetro efectivo 10%	0,063 mm	0,063 mm
		Diámetro efectivo 60%	0,08 mm	0,08 mm
	Arcillas ocreas con bivalvos	Peso unitario	19 Kn/m ³	19 Kn/m ³
		Cohesión	100	20
		Ángulo de rozamiento	0°	23°
		Permeabilidad (Método Fredlund-Xing-Huang)	1*10 ⁻⁹ m/seg	1*10 ⁻⁹ m/seg
		Diámetro efectivo 10%	0,063	0,063
		Diámetro efectivo 60%	0,2	0,2
Dique	Arcilla marrón plástica	Peso unitario	18 Kn/m ³	18 Kn/m ³
		Cohesión	43	13
		Ángulo de rozamiento	0°	20°
		Permeabilidad (Método Fredlund-Xing-Huang)	1,8*10 ⁻⁹ m/seg	1,8*10 ⁻⁹ m/seg
		Diámetro efectivo 10%	0,063 mm	0,063 mm
		Diámetro efectivo 60%	0,08 mm	0,08 mm

4.3.2.3 Situaciones de comprobación.

El análisis de la estabilidad global del dique y de cualquier talud afectado, en general, puede hacerse empleando los métodos habituales de cálculo de estabilidad de taludes en suelos, basados en la teoría de equilibrio límite.

Esta teoría establece el equilibrio de fuerzas y momentos actuantes en un sistema, aplicando exclusivamente las leyes de la estática, sin tener en cuenta las deformaciones del terreno y suponiendo que toda la masa movilizada se comporta como un sólido rígido.

A pesar de ser unos métodos más simplificados que los que tienen en cuenta las deformaciones, se utilizan mucho más dado que están ampliamente contrastados en la práctica, conociéndose bien sus grados de confianza. Entre ellos se puede citar los métodos de Morgenstern y Price, Spencer y Bishop.

Dentro de la estabilidad global de taludes podemos encontrar la estabilidad estática y dinámica.

El análisis de estabilidad estática del dique de cierre debe contemplar las siguientes situaciones:

- Situación de final de construcción: Esta situación se analizará en los casos en los que el dique de cierre esté constituido mayoritariamente por materiales arcillosos en los que se puede suponer que no se ha producido disipación de la presión intersticial durante el proceso de construcción.
- Embalse lleno: esta hipótesis supone que la carga de agua se corresponde con la cota de máximo embalse posible. Para los casos de balsas con elementos de impermeabilización externa se supondrá que el dique de cierre no hay línea piezométrica. Para los casos de balsas sin elemento de impermeabilización externo, se tendrá en cuenta la correspondiente línea de saturación, en función de que la balsa lleve únicamente un dren horizontal o un dren mixto.
- Rotura de elemento de impermeabilización externo: esta hipótesis supone que la carga de agua se corresponde con la cota de máximo embalse posible y aparece una línea de saturación en el cuerpo del dique.
- Desembalse rápido: esta hipótesis se corresponde con la situación en la que se produce un vaciado de la balsa a una velocidad mayor que la necesaria para que se produzca el drenaje del cuerpo del dique, lo que implica la presencia de sobrepresiones intersticiales en el interior del cuerpo del dique. A efectos del cálculo, y del lado de la seguridad, aún admitiendo el descenso que la línea de saturación se puede considerar que esta no se modifica y, por tanto, que la línea piezométrica coincide con la correspondiente a la situación del embalse lleno en el interior del dique y discurre por el exterior del talud interno del dique.

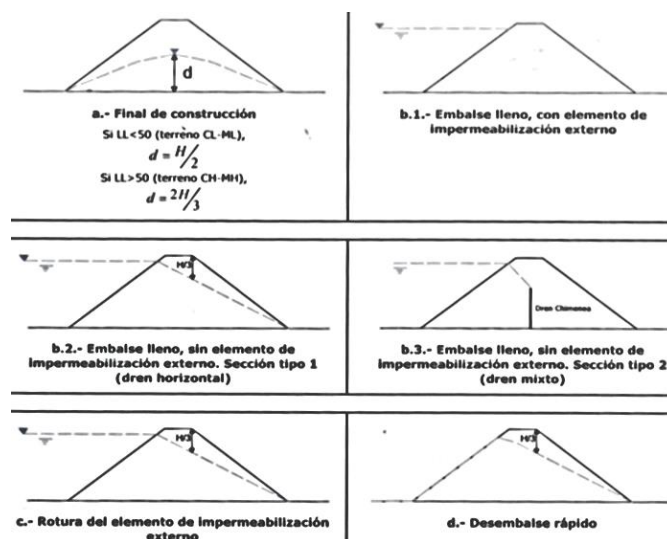


Figura 4-4. Esquema de distintas situaciones de cálculo.

4.3.2.4 Resultados de cálculo.

En esta primera aproximación utilizando Geoestudio, se ha comenzado con un talud de 1:5 en ambos lados del dique, según los resultados obtenidos a través de los ábacos de Taylor en el predimensionamiento. Posteriormente, se realizó una segunda aproximación con un talud interior de 1:3 y exterior de 1:6.

En cuanto al software empleado, se ha seleccionado el modelo de comprobación del terreno de Mohr-Coulomb, utilizando los mismos valores de los parámetros que componen el material, diferenciando entre condiciones a corto y largo plazo.

Para concluir si la construcción de la balsa es segura, nos hemos basado en los factores de seguridad establecidos en el manual para el diseño, construcción y explotación de balsas. Finalmente, se han adoptado factores de seguridad de 1,5 para situaciones con la construcción finalizada y de 1,3 para condiciones de sismo con el embalse lleno.

Estabilidad de talud 1:5 a ambos lados del dique con flujo de agua.

En dicho apartado se han analizado cuatro estudios diferentes, ya que fue necesario dividir el análisis entre el talud derecho e izquierdo de la balsa, así como evaluar las condiciones a corto y largo plazo. Los materiales, tanto naturales como compactados, se consideraron en situaciones saturadas y no saturadas.

Para el desarrollo del primer precálculo, se posicionó la lámina de agua a la cota +7 m por encima de la base de la balsa. Los datos de los materiales compilados son los mismos que se han aportado en los cuadros anteriores al definir el terreno, con el detalle de utilizar, a corto plazo, un ángulo de rozamiento de los materiales con valor de 0.

Los coeficientes de seguridad resultantes son los siguientes:

Factor de seguridad talud 1:5			
TALUD	CON FLUJO DE AGUA	Balsa Hato Blanco derecha corto	1,439
		Balsa Hato Blanco derecha largo	2,031
		Balsa Hato Blanco izquierda corto	2,323
		Balsa Hato Blanco izquierda largo	3,404

Figura 4-5. Factores de seguridad con talud 1:5 a ambos lados.

Con los datos aportados en la tabla anterior se ha llegado a la conclusión que sería necesario una modificación de los taludes ya que el talud exterior no cumple con el coeficiente de seguridad necesario que fuera de un valor por encima de 1,5. Por lo tanto se ha tomado un talud interior de 1:3 y un talud exterior de 1:6

Estabilidad de talud exterior 1:6 e interior 1:3 con flujo de agua.

Se ha llegado a la conclusión tras varias iteraciones que simplemente variando de 1:5 a 1:6 el talud exterior cumpliría el factor de seguridad de 1,5, pero para tener un mayor ahorro de materia se ha reducido el talud interior hasta 1:3 cumpliendo también el coeficiente de seguridad.

Los coeficientes de seguridad resultantes son los siguientes:

Factor de seguridad talud exterior 1:6 y talud interior 1:3			
TALUD COMPLETO	CON FLUJO DE AGUA	Balsa Hato Blanco derecha corto	1,779
		Balsa Hato Blanco derecha largo	2,085
		Balsa Hato Blanco izquierda corto	2,190
		Balsa Hato Blanco izquierda largo	2,222

Figura 4-6. Factores de seguridad con talud interior de 1:3 y exterior de 1:6.

A continuación, se va a exponer extractos de fotografía obtenidas del software Geoestudio, donde se puede observar el flujo de agua que parte desde la cota +7 m en el interior de la balsa y llega hasta el pie del talud exterior, también se puede observar los coeficientes de seguridad obtenidos a través de una cuadrícula de puntos con 10 fragmentaciones verticales y horizontales y 10 puntos de tangencia distintos para formar las distintas curvas de deslizamiento. Se ha optado por cuadrícula de puntos y puntos de tangencia ya que salen valores más limitantes que si se utiliza otros métodos que contiene el programa como el llamado límites de superficies de deslizamiento.

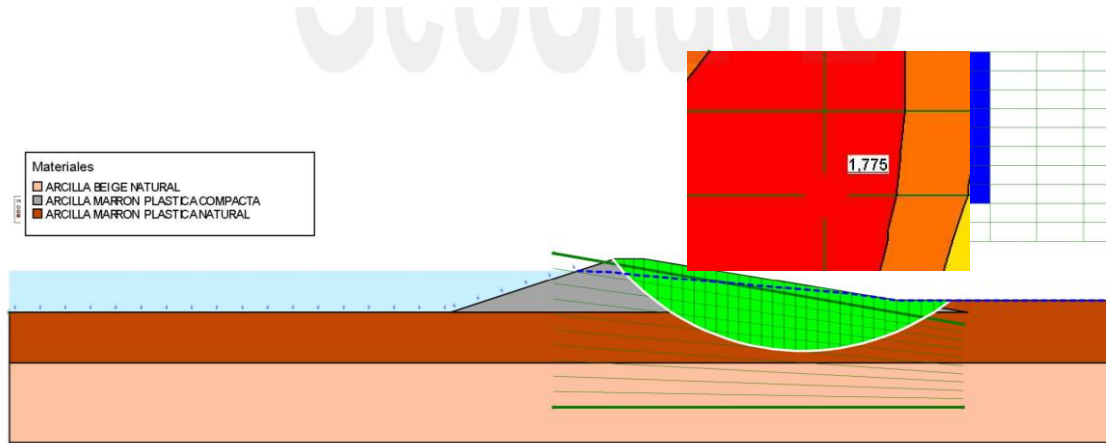


Figura 4-7. Imagen talud exterior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 corto plazo.

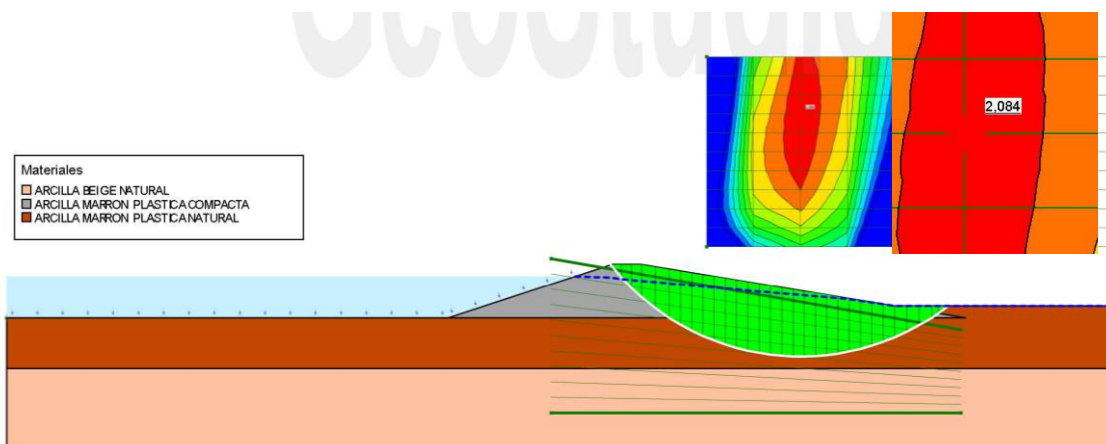


Figura 4-8. Imagen talud exterior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 largo plazo.

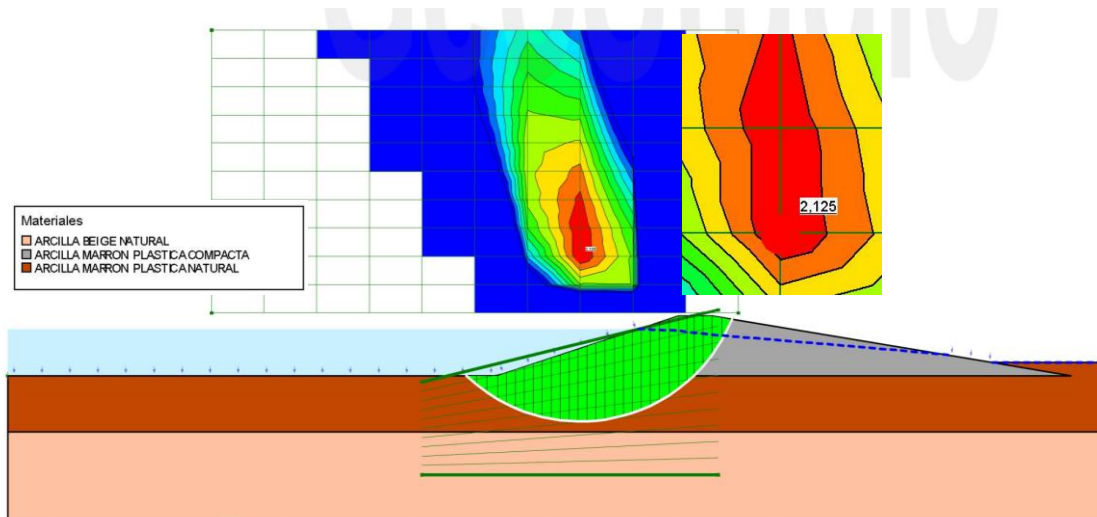


Figura 4-9. Imagen talud interior de Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 corto plazo.

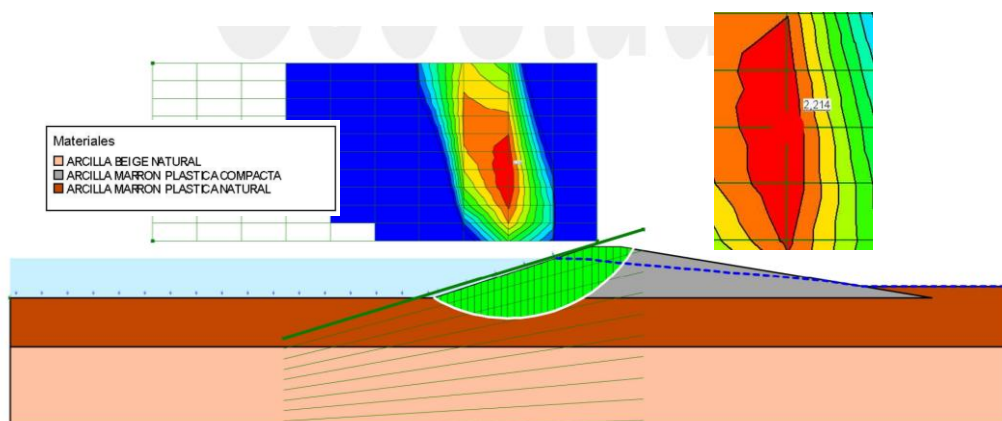


Figura 4-10. Imagen talud interior Geoestudio con factor de seguridad, talud exterior de 1:3 y exterior de 1:6 largo plazo.

A través de la obtención de los resultados de Geoestudio se ha llegado a la conclusión que los arcos de los círculos son profundos llegando el más desfavorable a intersectar al estrato arcilloso plástico marrón y sobrepasan tanto la coronación como el pie del talud que se esté estudiando.

4.3.2.5 Resumen de cálculo.

La conclusión de la geometría final que se ha obtenido del software Geoestudio de la casa Seequent solo con la intervención del flujo del agua, ha sido de una altura desde el vaso de la balsa de 9,75 metros, talud de 1:6 en exterior e interior de 1:3 dando factores de seguridad por encima de 1,5 según normativa. Esta geometría se corroborará en el punto siguiente a través del cálculo final por Plaxis.

4.3.3 Comprobación por método de los elementos finitos (MEF).

4.3.3.1 Software informático y modelización.

El software utilizado para la comprobación de los elementos finitos ha sido Plaxis 2D de Bentley. La diferencia más notable al modelar la balsa en Plaxis ha sido la secuencia utilizada para modelar la consolidación de los estratos durante un año, permitiendo que adquieran resistencia al finalizar el segundo año de consolidación.

La secuencia de cálculo introducida en Plaxis es la siguiente:

- **Fase inicial:** Se establecen los datos característicos del terreno y los espesores de los estratos, añadiendo mayor dimensión en el segundo estrato y aumentando la longitud a la izquierda y a la derecha para realizar un cálculo correcto y una mejor distribución del bulbo de tensiones al introducir el sismo.
- **Ejecución de la primera mitad del talud:** Debido a la composición arcillosa de los estratos, se ejecuta la primera mitad del talud para lograr una consolidación más efectiva.
- **Consolidación del estrato:** Esta consolidación se lleva a cabo durante un año para asegurar un asentamiento adecuado de los estratos y permitir que el terreno adquiera la máxima resistencia.
- **Ejecución del talud completo:** Tras la consolidación previa de un año, se ejecuta el talud completo.
- **Consolidación secundaria del talud completo:** Se lleva a cabo una consolidación secundaria de un año.
- **Establecimiento del flujo del agua:** El nivel del agua se fija a la cota +7 m y se establece el drenaje de toda la balsa a través del elemento geogrid, que constituye al geotextil, aportando resistencia y permeabilidad a la balsa.
- **Determinación del factor de seguridad:** Se establece el factor de seguridad solo con la intervención del flujo del agua, obteniendo un valor aproximado de 1,8.
- **Simulación del terremoto hacia la derecha:** Se introduce una aceleración de cálculo horizontal de 0,1g y el 70 % de la aceleración vertical, resultando en un valor de 0,07g.
- **Determinación del coeficiente de seguridad del terremoto hacia la derecha:** El factor de seguridad resultante es aproximadamente 1,3.
- **Simulación del terremoto hacia la izquierda:** Se aplican los mismos valores de aceleración, pero con signo negativo.
- **Reevaluación del coeficiente de seguridad del terremoto hacia la derecha:** Los valores del coeficiente de seguridad superan 1,3.

4.3.3.2 Parámetros geotécnicos.

En dicho apartado vamos a exponer los datos necesarios para la realización del cálculo:

- 1- Se conoce que la balsa se encuentra en un terreno de marismas y depositada en arcillas con expansividad baja.

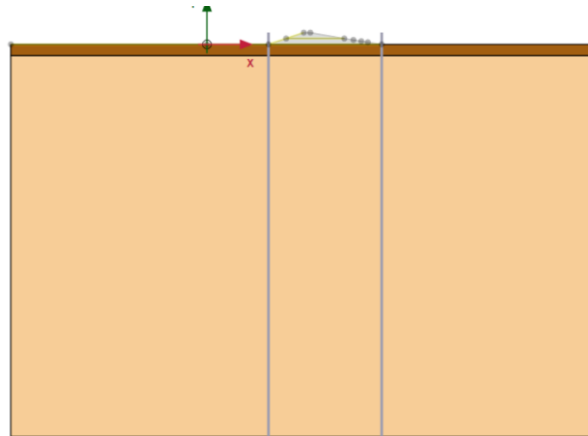


Figura 4-11. Visualización del modelo en el software Plaxis.

- 2- Los datos de caracterización de los materiales han sido los mismos que los expuestos en la tablas anteriores dentro del informe geotécnico. Para que el desarrollo de cálculo sea adecuado se ha extendido los terrenos en la dirección horizontal y en la vertical (hacia abajo) para que así la distribución del bulbo de presiones sea optima.

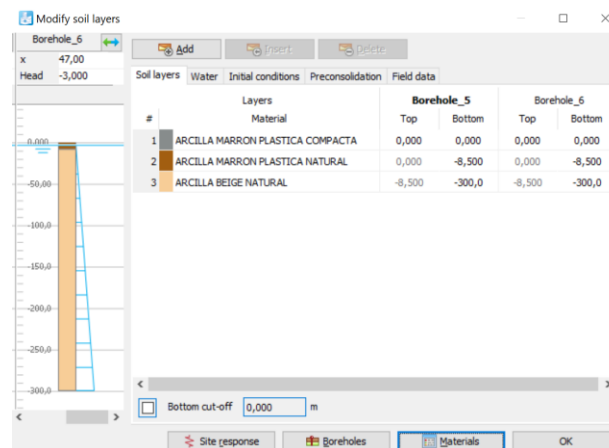


Figura 4-12. Visualización de los materiales en el software Plaxis.

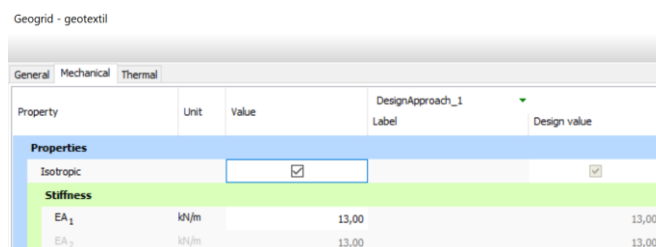


Figura 4-13. Visualización de los parámetros del geotextil en el software Plaxis.

- 3- El proceso constructivo de la balsa ha sido en dos etapas, en la cual se ha dividido horizontalmente en dos partes iguales con un periodo de consolidación entre partes de un año.

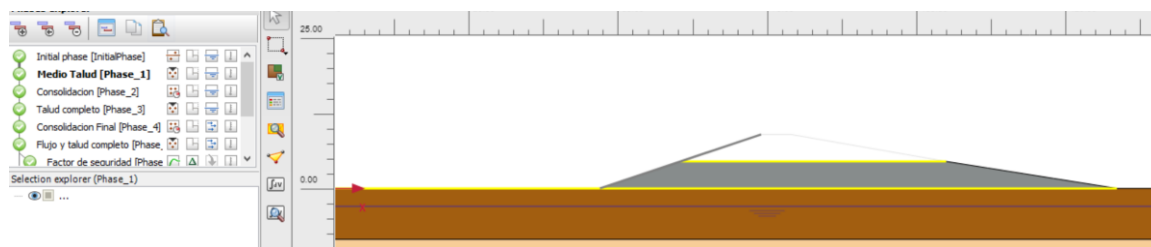


Figura 4-14. Visualización de la mitad del talud en el software de Plaxis.

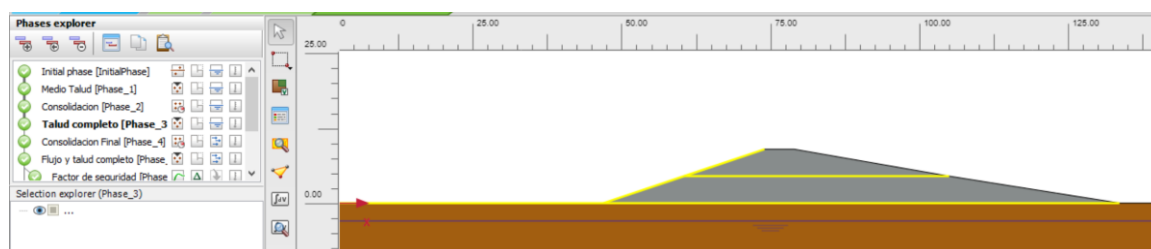


Figura 4-15. Visualización del talud completo en el software de Plaxis.

- 4- Referente al geotextil se ha optado por uno con una resistencia de 13,57 kN/m (G-705-PP; Empresa: Logrotex (Logrotex.SL, s. f.)) ubicados en el vaso de la balsa, y también en la mitad de la balsa para así adquirir resistencia a tracción, para poder combatir el movimiento transmitido por el terremoto y ofrecer una adecuada impermeabilidad a la balsa.
- 5- Referente al flujo del agua la balsa, se conforma el llenado, una vez conformada la última consolidación y la puesta total del geotextil.
- 6- Conforme a la ubicación de la balsa nos encontramos entre los municipios de Isla Mayor y Villamanrique de la Condesa dando lugar a los valores de Coeficiente de contribución ($K=1,2$), Aceleración básica ($a_b=0,08$ g), Coeficiente de riesgo ($p=1$), y Coeficiente del terreno ($C=1,6$).
- 7- Para finalizar se han ejecutado los valores del terremoto con su aceleración de cálculo tanto horizontal como vertical. La ejecución de la vertical se ha expuesto como el 70% de la aceleración de cálculo horizontal y la aceleración de cálculo horizontal corresponde a la aceleración de cálculo con un valor de $a_c=0,1$ g según los datos obtenidos del punto anterior.
- 8- En el proceso de cálculo se ha ejecutado el movimiento del terremoto en las dos direcciones tanto hacia la derecha como hacia la izquierda.

4.3.3.3 Resultados de cálculo.

Para el cálculo definitivo se ha concluido con un talud exterior de 1:6 y 1:3 en el interior. Conforme al manual de balsas los valores expuestos para una combinación de acciones casi permanente deben de pasar un factor de seguridad de 1,5 mientras que para las cargas accidentales (sismo) deben de pasar un coeficiente de seguridad de 1,3. Según las soluciones aportadas por Plaxis, en las acciones casi permanentes corresponde a un factor de seguridad de 2,15, mientras que en las cargas accidentales llega hasta 1,33, por lo tanto, las soluciones aportadas son válidas.

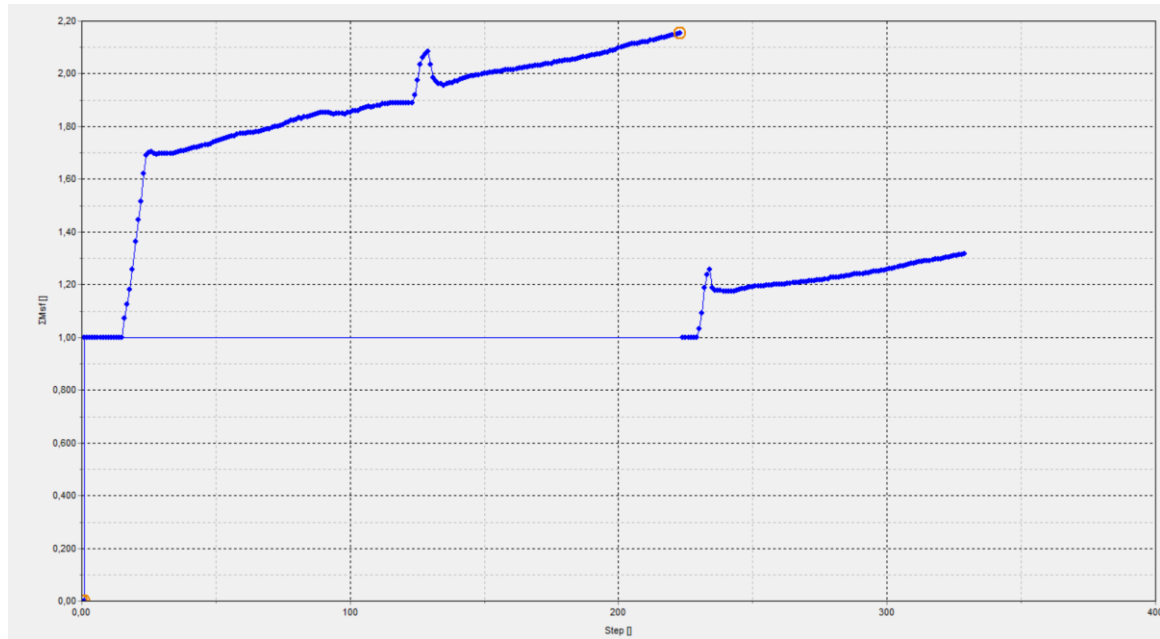


Figura 4-16. Valores finales de los coeficientes de seguridad.

4.3.4 Conclusiones.

A modo de conclusión, y de acuerdo con las soluciones propuestas por el software, hemos llegado a la decisión de construir una balsa compuesta por materiales arcillosos plásticos obtenidos del primer estrato útil del terreno, con una geometría definida por taludes interiores de 1:3 y exteriores de 1:6, sin incluir el rastrillo en la base del dique.

El drenaje seleccionado es del tipo espina de pez, con una separación de 30 metros entre elemento y dividido a cuatro aguas para minimizar la necesidad de excavación provocados por las pendientes y dimensiones de la balsa. La altura final de la balsa se ha establecido en 9,75 metros, medida desde el fondo de la misma.

Finalmente, la geometría y las características del terreno han sido verificadas mediante los coeficientes de seguridad obtenidos, los cuales superan el valor de 1,3 en condiciones sísmicas y el valor de 1,5 en lo referente a la intervención del flujo del agua.

Figura 4-17. Croquis balsa.

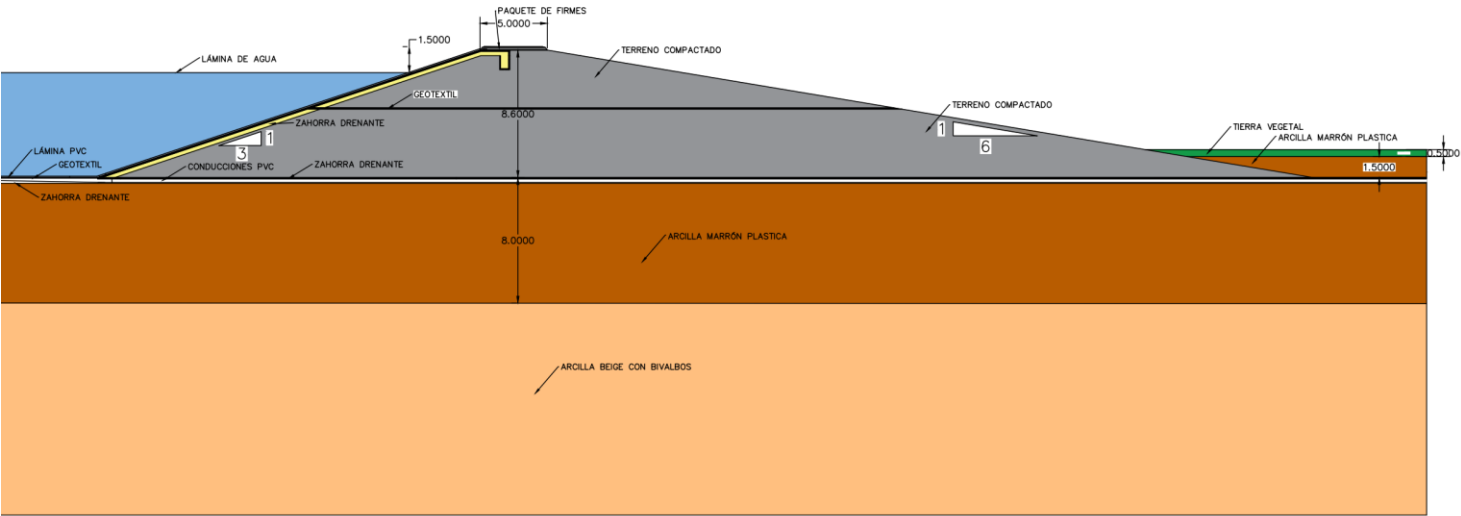
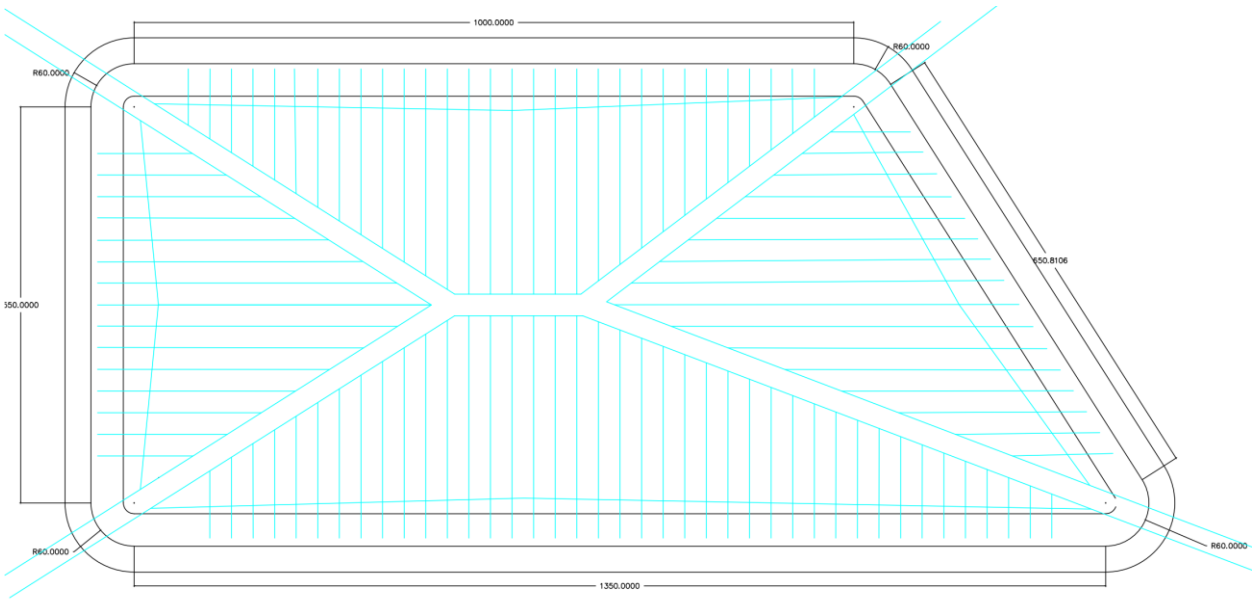


Figura 4-18. Croquis drenaje.



5 BIBLIOGRAFÍA

- Básico, D. (2019). *Documento basico Seguridad estructural*.
<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- Editorial: TyB editores, & Ministerio de medioambiente. (2010). *Manual de para el diseño, cosntrucción, explotación y mantenimiento de blasas*.
- Instituto geológico y minero de España. (s. f.). IGME. Recuperado 1 de julio de 2024, de <https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/cartoGeo.htm>
- Logrotex.SL. (s. f.). *Catalogo de geotextil*. Recuperado 1 de julio de 2024, de <https://www.logrotex.com/files/descargas/catalogo-geotextil-es.pdf>
- Norma de construccion sismoresistente: Parte general y edificación, & Ministerio de fomento. (s. f.). *NCSE-02*. Recuperado 1 de julio de 2024, de https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Soriano Peña, Antonio. (2005). *ROM 0.5-05 recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias*. Puertos del Estado.

