



**Gobierno de Navarra**  
Departamento de Obras Públicas,  
Transportes y Comunicaciones

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE NAVARRA  
ESCALA 1:25.000

**HOJA 282-III**

**TUDELA**

MEMORIA

---

La presente Hoja y Memoria, ha sido realizado por “TECNOLOGÍA DE LA NATURALEZA S.L. (TECNA)”, durante el año 2002-2003, con normas, dirección y supervisión del Gobierno de Navarra, habiendo intervenido los siguientes técnicos:

**Dirección y Supervisión (GOBIERNO DE NAVARRA)**

Faci Paricio, E.                      Dirección del Proyecto

**Autores y Colaboradores (TECNA S.L.)**

Galán Pérez, G.                      Cartografía, Memoria e Informática

García de Domingo, A,              Cartografía y Memoria

Cabra Gil, P.                          Geomorfología y Cuaternario

Díaz Pinto, G.                        Informática, Geología y Geotecnia

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTRATIGRAFÍA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Terciario .....	5
2.1.1. Mioceno .....	7
2.1.1.1. Arcillas, limos, areniscas y conglomerados, (Facies de Cascante), (nivel 371). Ageniense-Aragoniense. ....	7
2.1.1.2. Arcillas con niveles de calizas (Facies Tudela, nivel inferior), (nivel 378). (Ageniense-Aragoniense).....	8
2.1.1.3. Arcillas limosas rojas y beige (Facies Alfaro, nivel intermedio), (nivel 388). (Ageniense-Aragoniense). ....	9
2.1.1.4. Arcillas limosas rojas y beige (Facies Alfaro, nivel superior), (nivel 389). (Ageniense-Aragoniense).....	10
2.1.1.5. Arcillas con niveles de calizas (Facies Tudela, nivel superior), (nivel 396). (Ageniense-Aragoniense).....	11
2.2. Cuaternario.....	12
2.2.1. Pleistoceno.....	12
2.2.1.1. Gravas, cantos, arenas, arcillas y limos (Terrazas), (niveles 505 a 508, 524, 525). Pleistoceno inferior- Pleistoceno superior. ....	12
2.2.1.2. Cantos y gravas con matriz limo-arcillosa (Glacis), (nivel 518). Pleistoceno inferior-superior. 13	
2.2.2. Holoceno.....	13
2.2.2.1. Arcillas, arenas y gravas (Aluvial-coluvial), (nivel 537). Holoceno .....	13
2.2.2.2. Lutitas, cantos, gravas y arenas (Fondos de valle), (nivel 527). Holoceno.....	14
2.2.2.3. Limos, arcillas y arenas con cantos y bloques (Coluviones), (nivel 543). Holoceno... 14	
2.2.2.4. Limos, arenas y cantos (Conos de Deyección), (niveles 512 y 536). Pleistoceno y Holoceno. 14	
2.2.2.5. Arenas y limos con materia orgánica (Fondos endorreicos), (nivel 542). Holoceno... 15	
2.2.2.6. Gravas, arenas y limos (Llanura de inundación), (nivel 526). Holoceno. .... 15	
2.2.2.7. Gravas, cantos y bloques (Barras), (nivel 529). Holoceno. .... 16	
<b>3. TECTÓNICA.....</b>	<b>17</b>
<b>4. GEOMORFOLOGÍA .....</b>	<b>20</b>
4.1. DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA .....	20
4.2. ANTECEDENTES .....	21

---

4.3. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO .....	22
4.3.1. Estudio MORFOESTRUCTURAL.....	22
4.3.1.1. Formas estructurales .....	22
4.3.2. Estudio del modelado .....	23
4.3.2.1. Formas de ladera .....	23
4.3.2.2. Formas fluviales .....	24
4.3.2.3. Formas endorreicas. ....	26
4.3.2.4. Formas poligénicas .....	26
4.3.2.5. Formas antrópicas .....	26
4.4. FORMACIONES SUPERFICIALES .....	27
4.5. EVOLUCIÓN DINÁMICA .....	30
4.6. MORFOLOGÍA ACTUAL-SUBACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS .....	31
<b>5. HISTORIA GEOLOGICA.....</b>	<b>32</b>
<b>6. GEOLOGÍA ECONÓMICA .....</b>	<b>38</b>
6.1. RECURSOS MINERALES .....	38
6.1.1. Minerales y Rocas Industriales. ....	38
6.1.1.1. Gravas .....	38
6.1.1.2. Arcillas .....	39
6.2. HIDROGEOLOGIA .....	39
6.2.1. Introducción .....	39
6.2.2. Descripción de las FORMACIONES .....	39
6.2.3. Unidades acuíferas .....	42
6.2.3.1. Unidad hidrogeológica sur .....	42
6.2.3.2. Unidad Hidrogeológica Aluvial del Ebro y Afluentes .....	44
6.2.3.3. Manantiales .....	46
6.3. GEOTECNIA .....	47
6.3.1. Introducción .....	47
6.3.2. Metodología.....	47
6.3.3. Zonificación geotécnica .....	49
6.3.3.1. Criterios de división .....	49
6.3.3.2. División en Áreas y Zonas Geotécnicas.....	49
6.3.3.3. Características geotécnicas .....	50
<b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>85</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

La Hoja a escala 1:25.000 de Tudela (282-IV), es el cuarto cuadrante de la Hoja a escala 1:50.000 del mismo nombre. La totalidad de la Hoja pertenece a la Comunidad Foral de Navarra, dentro de la comarca de la Ribera Navarra del Ebro, región que se extiende a lo largo de las márgenes del Ebro en el límite con las Comunidades autónomas de La Rioja y Aragón, constituyendo una unidad fisiográfica deprimida y algo alomada. Además de la población de Tudela, que da nombre a la Hoja y esta considerada la capital de esta comarca Navarra, en ella también se incluyen otros núcleos importantes como son los de Murchante, Cabanillas y una pequeña parte del casco urbano de Cascante.

Toda esta zona pertenece al dominio de la Cuenca del Ebro, en la que aparecen materiales del Terciario continental y depósitos cuaternarios, ampliamente representados en toda la Hoja. En esta zona se pueden diferenciar dos zonas bien diferenciadas desde el punto de vista geológico, por un lado la llanura aluvial del río Ebro, eminentemente llana, y formada exclusivamente por depósitos superficiales cuaternarios, de origen fluvial y en su margen izquierda una serie de relieves, que se levantan más de 100 metros sobre la llanura del Ebro de edad Terciario, formados esencialmente por yesos a los que recubren materiales arcillosos.

Esta es una zona eminentemente plana, dominada por la llanura aluvial del Ebro, en cuyo extremo suroriental se localiza la cota mas baja de la Hoja, de 245 m. de altitud. Las únicas zonas de relieve se localizan en su esquina nororiental, donde el Monte San Gregorio alcanza una altitud de 346 m. y en los relieves situados al norte del núcleo urbano de Tudela, en la zona de Canraso donde se ubica la cota mas alta de la Hoja, de 392 m. de altitud.

El río Ebro es el principal curso de la red fluvial en esta Hoja, discurriendo en sentido NNO-SSE por la mitad más occidental de la zona de estudio, en un curso sinuoso. Toda la Hoja esta incluida en su cuenca. Al margen de este curso principal, el resto de la red fluvial es escasa y muy esporádica, estando formada por pequeños arroyos que desaguan los relieves situados en las proximidades. Únicamente destaca el río Queiles, que, procedente de los relieves del Moncayo, situados al sur, aparece en la Hoja por Cascante y desagua al Ebro en Tudela. Sin embargo, toda la zona, en especial, el aluvial

del Ebro, está surcada por numerosos canales, como los de Lodosa, Imperial de Aragón y Tauste, y acequias de regadío.

La red de comunicaciones en esta zona es amplia y desarrollada al incluirse dentro del corredor del Ebro. Así, como vías principales discurren por la Hoja la autopista A-68 (Bilbao-Zaragoza), la nacional N-232, ambas siguiendo el valle del Ebro. Además la red de carreteras autonómicas y comarcales comunica las distintas poblaciones entre sí y con la capital de la comarca. En la margen izquierda se localizan las autonómicas NA-121 y NA-126, que discurren paralelamente al río Ebro; mientras que en la margen derecha son más numerosas en su margen izquierda, siendo las principales las siguientes: NA-160, N-121-C y la NA-3010.

Geológicamente, la Hoja de Tudela forma parte de la Cuenca del Ebro, una de las principales cuencas terciarias peninsulares. En esta cuenca se distinguen dos grandes ciclos sedimentarios: Un primer ciclo de carácter marino, en la que la cuenca estaría conectada con el océano situado al Este, abarcando los sedimentos hasta el Eoceno terminal y una segunda etapa de carácter continental, actuando de forma endorreica que se desarrollaría a lo largo de todo el Eoceno terminal, Oligoceno y Mioceno. A partir del Plioceno, en la cuenca ya colmatada se desarrolla una fase erosiva que tiene su origen en el desarrollo de la red fluvial del Ebro, con drenaje hacia el Mediterráneo.

Toda esta zona se comportó durante el Terciario como una subcuenca (Cuenca Navarro-Riojana en el sentido de SALVANY, 1989) con relativa independencia de los sectores vecinos, representados al E y O por el Sector Central o Aragonés y de La Bureba, respectivamente. Los márgenes septentrional y meridional de la Cuenca Navarro-Riojana están delimitados por los cabalgamientos de la Sierra de Cantabria y Cuenca de Pamplona (Pirineos) al Norte, y por las Sierra de Cameros y Moncayo (Cordillera Ibérica) al Sur y Suroeste.

A este segundo ciclo continental pertenecen todos los materiales de la Hoja de Tudela, incluida dentro del denominado "Sector occidental de la cuenca del Ebro". Denominación acuñada por ORTI y SALVANY(), para agrupar las formaciones terciarias que están bien desarrolladas en la Ribera de Navarra y continúan hacia la Rioja y la zona occidental de

la Cuenca del Ebro en Aragón. En Navarra, toda la sedimentación de Terciario continental se extiende desde el tránsito Eoceno-Oligoceno hasta el Mioceno superior, estando caracterizada por el desarrollo de sistemas de abanicos aluviales en los márgenes de la cuenca (Pirineos e Ibérica), sistemas fluviales y fluviolacustres en las zonas intermedias de transición y sistemas lacustres en las zonas centrales de la cuenca.

Toda la Hoja esta ocupada por el valle del río Ebro, cuyos depósitos fluviales ocupan más de la mitad del territorio cartografiado. Además de estos depósitos de carácter fluvial, también aparecen en la Hoja depósitos originados en procesos de laderas, poligénicos y de carácter endorreico.

Aunque los primeros estudios sobre esta zona datan de las primeras décadas del siglo XX, realmente fue en la década de los años 60 del pasado siglo cuando se realizaron los primeros estudios importantes. Se trata de estudios de carácter estratigráfico regional y se deben en gran medida a ORIOL RIBA y diversos colaboradores (RIBA, 1955, 1964, RIBA y PÉREZ, 1962, CRUSAFONT et al., 1966, y más recientemente, RIBA et al., 1983, RIBA y JURADO, 1992 y RIBA, 1992). En esta misma época se inicia la prospección petrolera en el país con la perforación, en las hojas de Peralta y Calahorra, de los sondeos Marcilla-1, (Valdebro, 1953) y Arnedo-1, (Amospain, 1962), y cuyos resultados figuran de forma resumida en la publicación específica del IGME, (1987).

Ya en la década de los años 70, el conocimiento de la geología de esta zona del Terciario de Navarra se amplía con la elaboración de la primera cartografía a escala 1:25.000 de Navarra, pionera en España y realizada por geólogos de la Diputación Foral de Navarra: Jaime Solé, Javier Castiella, Cayo Puigdefábregas, Joaquín Del Valle y otros colaboradores. Estas cartografías se sintetizan con la publicación del primer Mapa Geológico de Navarra (CASTIELLA et al., 1978) a escala 1:200.000,. De esta misma época son también los primeros mapas geológicos a escala 1:50.000 del Plan MAGNA editados por el IGME (Hojas de Sádaba, Lodosa, Logroño, Alfaro, Calahorra, Tudela y Sos del Rey Católico) y realizados por el mismo grupo de geólogos, con la asistencia del paleontólogo Ramírez del Pozo. Otro trabajo relevante de este período es la tesis de licenciatura de SOLÉ (1972) sobre el Terciario del margen NO de la Ribera de Navarra.

A finales de la siguiente década SALVANY, (1989) presenta su tesis doctoral, centrada en el estudio de los depósitos lacustres evaporíticos del Terciario de Navarra y La Rioja. Esta tesis estuvo financiada por el Gobierno de Navarra, en un convenio con la Universidad Central de Barcelona, cuyo informe final fue realizado por ORTÍ y SALVANY, (1986). De los estudios de Salvany se derivan un buen número de publicaciones, entre las que destacan las de SALVANY (1989), MUÑOZ y SALVANY (1990), SALVANY et al. (1994), SALVANY y ORTÍ (1994), y INGLÉS et al (1994, 1998).

También son importantes los trabajos realizados por diversos autores sobre las Unidades Tectosedimentarias en la Cuenca del Ebro. En especial, destaca la tesis de A. MUÑOZ (1991) dedicada al análisis tectosedimentario del terciario en la Rioja, así como otros trabajos del mismo autor en colaboraciones, MUÑOZ, PARDO y VILLENA (1986-87 Y 1992), y MUÑOZ y CASAS (1997), y los trabajos sobre la estratigrafía y sedimentología de la región Tarazona-Tudela: PEREZ, MUÑOZ., PARDO y ARENAS, (1989); PEREZ.; MUÑOZ.; PARDO.; ARENAS. y VILLENA, (1988)

Durante esta década de los 80 el IGME publica las Hojas MAGNA a escala 1:50.000 de Allo, Tafalla, Viana, Peralta y Sangüesa. Entre los estudios más recientes cabe destacar la revisión y actualización del Mapa Geológico de Navarra, a escala 1:200.000 (GOBIERNO DE NAVARRA, 1997) y a escala 1:25.000, en cuyo marco se realiza el presente trabajo.

La cartografía de esta Hoja esta basada en la realizada a escala 1:25.000 por la DIPUTACIÓN FORAL DE NAVARRA, la Hoja de Tudela a escala 1:50.000 del plan MAGNA, y los datos cartográficos de distintos estudios, entre ellos las tesis doctorales de SALVANY() Y MUÑOZ(). Sobre todas se ha realizado la pertinente actualización cartográfica y geológica en base a criterios estructurales y sedimentarios fundamentalmente.

## **2. ESTRATIGRAFÍA**

La estratigrafía de esta Hoja se ha realizado basándose en criterios secuenciales, definiendo unidades tectosedimentarias limitadas por rupturas deposicionales con expresión cuencal. En cada unidad así definida y delimitada se han cartografiado los distintos cuerpos litológicos, determinando hasta donde ha sido posible, sus variaciones espaciales y sus relaciones de facies.

La descripción de los niveles se ha realizado con el apoyo de las distintas bases de datos elaboradas en esta Hoja, agrupándose dichos niveles en las diferentes unidades tectosedimentarias que se han definido en esta región, teniendo en cuenta la escala de trabajo y su carácter, eminentemente cartográfico.

Desde el punto de vista geológico, esta Hoja se encuentra situada en el tránsito entre la Cadena Ibérica y la Cuenca del Ebro. Los materiales aflorantes pueden agruparse en dos grandes conjuntos: Terciario y Cuaternario, cuyas características y distribución presentan acusadas diferencias estando totalmente ausentes los depósitos pertenecientes al Paleozoico y Mesozoico.

El sistema terciario, comienza en esta Hoja por una serie de depósitos evaporíticos, pertenecientes a la Fm. Los Arcos, constituyendo la UTS inferior de esta zona, sobre los que se superponen varios sistemas de abanicos aluviales, cuyos ápices se localizan en la Ibérica, y lacustres, asignados al Neógeno, y en el que se han diferenciado cuatro Unidades Tectosedimentarias, aflorando en esta hoja, únicamente las dos inferiores.

### **2.1. TERCIARIO**

En Navarra, los sedimentos del Terciario continental de la Cuenca del Ebro, se distribuyen por el sector meridional de esta comunidad, estando comprendidos estratigráficamente entre el Eoceno-Oligoceno y el Mioceno superior.

El límite septentrional de esta cuenca, esta constituido por importantes accidentes tectónicos con dirección preferente E-W (fallas de Codés-Monjardín, Alaiz y Monreal), que

ponen en contacto los sedimentos continentales que rellenan esta cuenca con depósitos del Mesozoico y Paleógeno surpirenaico.

El límite meridional, esta formado por los sedimentos del Mesozoico de la Cordillera Ibérica. Por el este, estos sedimentos del Terciario continental mantienen una continuidad a través de Aragón y Cataluña y por el oeste continúan hacia la Comunidad de La Rioja, formando en conjunto la Cuenca Terciaria Continental del Ebro.

En este sector, la sedimentación estuvo en todo momento caracterizada por el desarrollo de sistemas de abanicos aluviales en los márgenes de la cuenca (Pirineos y Cordillera Ibérica) y sistemas lacustres principalmente evaporíticos en su zona central, así como sistemas fluviales y fluvio-lacustres intermedios de extensión y características variables según los casos (RIBA, 1964; CRUSAFONT et al., 1966a; PUIGDEFABREGAS, 1975; RIBA et al., 1983; SALVANY, 1989a, PEREZ, 1989; MUÑOZ, 1991).

Esta cuenca presenta una importante subsidencia durante el Oligoceno, sedimentándose más de 4000 metros de depósitos. En el Mioceno, estos procesos de subsidencia se ralentizan, acumulándose únicamente unos centenares de metros de sedimentos, iniciándose, en este periodo, las fases principales de plegamiento que marcan profundamente la paleogeografía de la cuenca. Estos factores determinan que el depocentro de la cuenca de los sistemas lacustres, emigre hacia el este, hacia Aragón, dominando en Navarra y la Rioja la sedimentación detrítica, con el emplazamiento de amplios sistemas aluviales en los márgenes de la cuenca y el desarrollo de sistemas fluviales y fluvio-lacustres en la zona central, con su drenaje hacia el centro de la cuenca.

El Terciario continental navarro ofrece una gran variedad de cuerpos litológicos que se distribuyen irregularmente tanto en la horizontal como en la vertical, lo que a su vez condiciona una enorme profusión de cambios laterales de facies.

En esta zona, se han definido por PEREZ, 1989; en el Neógeno, cuatro Unidades Tectosedimentarias que integran sistemas aluviales y lacustres, estando bien representados en esta zona la primera y la segunda UTS. En la primera UTS se integran la Formación Fitero, en las zonas proximales a la Cordillera Ibérica, y las Formaciones

Cascante, Alfaro, Tudela y Monteagudo, cuya edad esta comprendida entre el Ageniense y el Aragoniense medio. La segunda UTS, comprendida entre el Aragoniense medio y superior, equivale a la parte superior de la Formación Fitero y a facies detríticas y carbonatadas por encima de la Formación Yesos de Monteagudo. Las UTS tercera y cuarta afloran en sectores más alejados de esta hoja.

MUÑOZ, 1992; define en esta región diez UTS, de las que las ocho primeras afloran en la Cuenca del Ebro y las dos restantes en cubetas marginales. Siguiendo los criterios establecidos por este autor y atendiendo a los depósitos que afloran en esta Hoja, define en esta zona las UTS A5, A6, A7 y A8, cuyos límites se corresponden con los establecidos por PEREZ, 1989, e indicados anteriormente.

### **2.1.1. Mioceno**

#### **2.1.1.1. Arcillas, limos, areniscas y conglomerados, (Facies de Cascante), (nivel 371). Ageniense-Aragoniense.**

Este conjunto aflora en la zona próxima a Cascante, en la esquina suroccidental de la Hoja.

El tránsito con los conglomerados de Fitero se realiza de forma gradual, posicionándose por debajo de la unidad anterior, indicando que el depocentro de la cuenca se desplaza hacia el Este, progradando las facies proximales encima de las distales.

Litológicamente, esta constituido por areniscas, arcillas y niveles de conglomerados. Las areniscas, presentan tonos pardos y rojos de naturaleza cuarcítica, calcárea y de fragmentos de rocas, con cemento calcáreo, fundamentalmente de grano medio, con numerosos clastos dispersos o formando niveles. Se disponen en estratos lenticulares con base canalizada o tabulares de 0,1 a 3 metros de espesor.

Los cantos de los conglomerados son de naturaleza silíceo o calcárea con matriz arenosa o microconglomerática, son subredondeados y bien clasificados, con cemento calcáreo y matriz areno-limosa.

Las arcillas son de tonos rojos con gran cantidad de limos.

El espesor de este conjunto se ha establecido en el centenar de metros, aunque es muy difícil de establecer debido a sus relaciones estratigráficas con los otros niveles de los que se considera cambio lateral de facies.

Este conjunto se ha datado, en el yacimiento de Monteagudo, como Ageniense-Aragoniense.

Desde el punto de vista sedimentológico, estos materiales forman parte de las zonas medias y proximales de un sistema de abanicos aluviales de procedencia meridional.

#### **2.1.1.2. Arcillas con niveles de calizas (Facies Tudela, nivel inferior), (nivel 378). (Ageniense-Aragoniense).**

Aparece exclusivamente en la zona del Monte de Valdetellas, hacia el Norte de la Hoja, en contacto transicional sobre la unidad lutítica inferior de la Fc. Alfaro, según se observa en la contigua hoja de Cintruénigo. El nivel de Alfaro inferior no llega a aflorar en esta Hoja de Tudela. En esta zona al este del río Ebro, el buzamiento suave de las capas, hacia el SSE, coincide aproximadamente con la superficie topográfica, de manera que presenta extensos afloramientos que culminan hacia el norte con los relieves de Cabezo Moro y Cabezo de Mari Juan. Al oeste del río Ebro, presenta buenos afloramientos en la terminación oriental de los Montes del Cierzo, ya fuera de esta Hoja. El espesor total de la unidad es de unos 30 m.

Son arcillas limosas de colores grises y beige, en ocasiones rojizas. Aparecen con intercalaciones de capas calcáreas principalmente, de calizas y margocalizas, aunque también pueden intercalarse capas de areniscas y limonitas. Se presentan en tramos de espesor decimétrico a métrico.

Los niveles calcáreos acostumbran a presentar texturas de tipo *grainstone* y grano fino. Pueden contener abundantes algas, bioclastos, intraclastos y proporciones variables de limos o lutitas terrígenas que les confieren un carácter más o menos margoso. Las capas de margocalizas pueden presentar fauna de lamelibranquios y gasterópodos. Se presentan en capas de espesor inferior a 1m, aunque en ocasiones se encuentran niveles de capas amalgamadas de hasta 3 m de espesor. La continuidad lateral de estas capas de caliza puede oscilar entre un centenar de metros y varios kilómetros.

Las capas menos frecuentes de areniscas y limonitas consisten en paleocanales de tipo ribbon, de varios metros de continuidad lateral, o bien en capas tabulares de espesor centimétrico a métrico.

Todo el conjunto de la unidad representa distintos episodios de sedimentación caliza en pequeños lagos de carácter relativamente efímero y salino, alternando con episodios en los que domina la sedimentación terrígena en ambientes de llanura lutítica aluvial, surcada localmente por pequeños canales fluviales sinuosos.

#### **2.1.1.3. Arcillas limosas rojas y beige (Facies Alfaro, nivel intermedio), (nivel 388). (Ageniense-Aragoniense).**

Se encuentra en contacto transicional sobre la unidad 24 y aflora en los Montes de Canraso, al norte de la población de Tudela, y especialmente en los montes orientales de la Hoja, bordeando los relieves de San Gregorio y Serralta.

Sus espesores son variables, aumentando progresivamente de ENE a OSO, ya que tanto la base como el techo de la unidad se interdigitan, cambiando de facies con las unidades de la Facies Tudela.

Esta unidad es la que se explota actualmente por la arcilleras que se localizan en la zona. En las laderas del Monte Canraso, en la zona central de la Hoja 282, se han medido 45 m de potencia.

Es en una sucesión predominantemente lutítica, formada por arcillas limosas de coloraciones rojizas, beige/ocre y grises, en tramos de espesor métrico, alternando con niveles de limolitas y areniscas finas de color beige, muy similares a la Unidad 23

Los tramos arcillosos contienen abundantes nódulos dispersos de yeso alabastrino, de 1-2 cm de diámetro y color blanco o acaramelado. Localmente estos nódulos pueden estar concentrados formando capas masivas de hasta 20 cm de espesor y escasa continuidad lateral, de yesos masivos micronodulares. También son frecuentes las vetas de yeso fibroso secundario.

Las areniscas son de grano fino a medio y tienen geometría de paleocanales, de hasta 3 m de espesor y 10-20 m de extensión lateral. Generalmente presentan relleno multiepisódico, con superficies de acreción lateral muy marcadas. Las limolitas son de color gris a beige y se encuentran en niveles de espesor centimétrico, frecuentemente amalgamados, formando capas de hasta un metro de espesor y escasa continuidad lateral.

Sedimentológicamente, las características de esta unidad denotan los típicos ambientes sedimentarios de llanura lutítica aluvial, surcada por pequeños canales sinuosos que la cruzan esporádicamente para desembocar en un lago salino efímero.

#### **2.1.1.4. Arcillas limosas rojas y beige (Facies Alfaro, nivel superior), (nivel 389). (Ageniense-Aragoniense).**

Aparece en contacto transicional superponiéndose directamente sobre la unidad intermedia de Alfaro, y en algunos casos sobre la unidad 27 de arcillas con niveles de calizas de la facies Tudela, si bien esta, normalmente desaparece por cambio de facies,.

No se puede precisar el espesor de la unidad, ya que falta el techo; no obstante, se estima un mínimo de 40-50 m.

Litológicamente es similar a las unidades terrígenas infrayacentes, ya que consiste en una sucesión predominantemente lutítica, de coloraciones rojizas o beige/ocre. A diferencia

de ellas, son menos frecuentes los niveles arenosos y los niveles con nódulos de yeso. Representan facies de llanura lutítica aluvial.

Aflora ampliamente al oeste del río Ebro en la mitad occidental y meridional de la Hoja, en aquellas zonas de relieve que no están cubiertas por depósitos cuaternarios, como en la zona al Oeste de Canraso, relieves próximos a Murchante y los situados al sur de la localidad de Fontellas.

#### **2.1.1.5. Arcillas con niveles de calizas (Facies Tudela, nivel superior), (nivel 396). (Ageniense-Aragoniense).**

Aparece en contacto transicional sobre la unidad intermedia y superior de Alfaro, ocupando amplias zonas de la mitad oriental de la Hoja..

Como en el resto de unida de la Facies Alfaro, su espesor es muy variable, dependiendo de su interdigitación con las unidades lutíticas infrayacentes (unidad 25) y con la unidad lutítica lateral (unidad 26), habiéndose medido su espesor máximo en la margen izquierda del Ebro, en el Monte de San Gregorio, con 50 m. de espesor. En la zona de Canraso, el espesor es de de unos 20 m, y disminuye progresivamente hasta desaparecer al oeste de la carretera N-232.

Litológicamente es muy similar a la similar a la unidad inferior de la Facies Tudela, ya que se trata de una sucesión fundamentalmente arcillosa con intercalaciones de capas de calizas y margocalizas, y con menor frecuencia en capas de areniscas y limolitas.

Las arcillas son algo limosas y predominan las tonalidades rojizas y beige/ocre, aunque también son frecuentes los niveles grises. Se presentan en tramos de espesor decimétrico a métrico.

Las calizas tienen texturas de tipo *grainstone* y grano fino, y se manifiestan en capas decimétricas que pueden amalgamarse en niveles de hasta 2 m. Las capas de margas o margocalizas son más frecuentes que en la unidad inferior de Tudela y son siempre de espesor centimétrico a decimétrico. La continuidad lateral de estas capas de caliza oscila entre un centenar de metros y varios kilómetros.

Las capas de areniscas y limolitas son poco frecuentes, mucho menos que en las Facies Alfaro, y consisten en pequeños paleocanales de tipo *ribbon*, de varios metros de continuidad lateral, o bien en capas tabulares de espesor centimétrico a métrico.

Desde el punto de vista sedimentológico, la interpretación es la misma que para la unidad caliza inferior. Representa distintos episodios de sedimentación caliza en pequeños lagos de carácter relativamente efímero y salino, alternando con episodios en los que domina la sedimentación terrígena en ambientes de llanura lutítica aluvial, surcada muy localmente por pequeños canales fluviales sinuosos.

## 2.2. CUATERNARIO

### 2.2.1. Pleistoceno

#### 2.2.1.1. **Gravas, cantos, arenas, arcillas y limos (Terrazas), (niveles 505 a 508, 524, 525). Pleistoceno inferior- Pleistoceno superior.**

Las terrazas pertenecen en su mayoría al río Ebro, pero algunos afloramientos corresponden al río Madre de Viosas. Considerándolas en su conjunto, los cinco niveles cartografiados se sitúan a las siguientes cotas: +5-8 m, +10-20 m, +25-30 m, +90-100 m y +130-140 m. Los dos niveles inferiores se han considerado como “bajas” y poseen un dispositivo de terrazas solapadas o encajadas, el nivel de +25-30 m, corresponde a las terrazas “medias” y el resto son terrazas “altas”, ofreciendo un dispositivo morfológico diferente, de terrazas colgadas, pues sus depósitos están desconectados de la red fluvial actual y, apareciendo, por debajo de ellas, el sustrato terciario subyacente.

La litología es muy similar en todos los niveles, si bien, la granulometría y el grado de cementación por carbonatos ofrece ligeras variaciones. En general, están formadas por gravas polimícticas con arenas y lutitas en proporción variable, predominando los clastos redondeados, de naturaleza silíceo (cuarcita, cuarzo, areniscas, lutitas) y carbonatada (calizas, dolomías, calcarenitas). Cuando aparecen cementaciones, se presentan como auténticos conglomerados. El tamaño de los clastos es diverso y, en ocasiones, se observan dos modas. En las terrazas altas, aunque el tamaño medio está comprendido entre 10 y 20 cm, se pueden alcanzar dimensiones hasta de 40 cm. En las terrazas bajas

la media es inferior, entre 6 y 10 cm, con máximos de 15 cm. Los espesores son muy irregulares, por lo general de 3-5 m, con valores algo superiores en las terrazas altas. Su edad abarca desde el Pleistoceno inferior al Pleistoceno superior.

#### **2.2.1.2. Cantos y gravas con matriz limo-arcillosa (Glacis), (nivel 518). Pleistoceno inferior-superior.**

Los glacis de cobertera aparecen como depósitos de gran extensión superficial. Se caracterizan por sus perfiles longitudinales plano-cóncavos, con aumento de la concavidad hacia la cabecera. Los más destacados son los situados al suroeste de la hoja, en la margen oeste del río Ebro. Por lo general, su composición refleja la del sustrato sobre el que se desarrollan, así como la de los relieves al pie de los cuales se generan. Están constituidos por gravas y lutitas con cantos dispersos, a veces bloques, de carácter anguloso a subanguloso, de composición, areniscosa y calcárea. Su génesis está en relación con el desmantelamiento de los relieves próximos y de glacis de techo de piedemonte. Por su posición en el relieve y su relación con el resto de los depósitos, se consideran de edad Pleistoceno inferior-superior.

### **2.2.2. Holoceno**

#### **2.2.2.1. Arcillas, arenas y gravas (Aluvial-coluvial), (nivel 537). Holoceno**

En algunas zonas, existen pequeños valles, muy poco encajados, en los que resulta difícil delimitar los depósitos que son de origen fluvial de los que proceden de las vertientes, habiendo sido preciso agruparlos cartográficamente como depósitos de origen aluvial-coluvial. Tienen escasa relevancia en cuanto a su potencia y representación, adaptándose groseramente a la forma de los valles. Su composición tiene escasas variaciones, reflejando, en cualquier caso, la naturaleza del sustrato donde se desarrollan, por ello predominan los términos lutíticos con delgadas hiladas de cantos de calizas y arenisca, así como niveles de arenas. Su espesor, difícil de establecer, debe oscilar entre 2 y 5m. Se les ha asignado la misma edad que a los depósitos de fondo de valle y a los coluviones, es decir, Holoceno.

#### **2.2.2.2. Lutitas, cantos, gravas y arenas (Fondos de valle), (nivel 527). Holoceno**

Los fondos de valle se distribuyen por la totalidad de la superficie de la hoja cubriendo las partes más bajas de ríos, arroyos y barrancos. Sus formas son alargadas y estrechas disponiéndose según direcciones de mayor debilidad o de tectónica dominante. Destacan los fondos de valle de los ríos Queiles y de la Tercia en la mitad sur de la hoja. En todos ellos predominan las lutitas grises y ocreas que contienen clastos de diferentes tamaños y naturaleza incluyendo, a veces, bloques. En menor medida, se observan niveles de arenas. La naturaleza de los clastos varía según la procedencia, pero, en esta zona, suelen ser de areniscas y escasas calizas. La potencia, casi nunca visible en su totalidad, se estima entre 3 y 5 m. Por su relación con la red fluvial actual, se les supone una edad Holoceno.

#### **2.2.2.3. Limos, arcillas y arenas con cantos y bloques (Coluviones), (nivel 543). Holoceno.**

Los coluviones aparecen dispersos por toda la superficie de la hoja. Son de formas alargadas, más o menos estrechas, y se disponen paralelamente a los ríos. Los mejores ejemplos se pueden observar en el sector central de la hoja, al sur de la localidad de Tudela. Son depósitos de reducido espesor, en general inferior a 2 m, de mediana representación superficial y distribuidos irregularmente, pero siempre al pie de las laderas, por lo que su constitución litológica, depende directamente de la naturaleza de los materiales que tenga por encima, pero predominan lutitas y arenas con cantos y bloques, angulosos a subangulosos, de areniscas y calizas de tamaño muy variable, con frecuencia de orden decimétrico. Por su posición con respecto a las laderas actuales y por su relación con el resto de los depósitos cuaternarios se han asignado al Holoceno.

#### **2.2.2.4. Limos, arenas y cantos (Conos de Deyección), (niveles 512 y 536). Pleistoceno y Holoceno.**

Se sitúan, mayoritariamente, en el valle del Ebro y se generan cuando la carga concentrada en estrechos barrancos alcanza áreas más amplias y de menor pendiente, donde se expande, dando lugar a estos depósitos con forma de abanico. En general son

conos aislados que a veces se presentan disectados por la red de incisión o por un nivel inferior de terraza. Están formados por limos y arenas que engloban delgados niveles de cantos. A veces ofrecen cementaciones pero de poco desarrollo. La potencia es muy variable, incluso dentro del mismo cono, siendo mayor en la zona apical, para adelgazarse hacia la zona distal. Como su material transportado por los cauces, la naturaleza de sus componentes dependerá mucho de la litología del área madre, pero por la posición que aquí ocupan, puede decirse que proceden de las formaciones terciarias de carácter fino y de las terrazas.

#### **2.2.2.5. Arenas y limos con materia orgánica (Fondos endorreicos), (nivel 542). Holoceno**

Son de escasa representación y están constituidos por depósitos finos asociados a áreas de drenaje deficiente, donde se producen encharcamientos. Se trata de arcillas grises y limos con un moderado contenido en materia orgánica y que en general poseen un espesor inferior a 1 m. Ocasionalmente pueden intercalar depósitos más groseros suministrados por los barrancos que llegan a la depresión. Por su disposición dentro del relieve actual se han atribuido al Holoceno.

#### **2.2.2.6. Gravas, arenas y limos (Llanura de inundación), (nivel 526). Holoceno.**

La llanura de inundación del río Madre de Viosas que con una dirección oeste-este, discurre por el cuadrante noroeste de la hoja es la única existente en esta hoja. Morfológicamente tiene una superficie extremadamente plana, de trazado algo curvilíneo, una anchura aproximada de 500 m y un grado de encajamiento casi nulo. Se trata de una llanura de inundación constituida por elementos finos, arenas y limos, con algunos niveles de cantos, procedentes del Terciario detrítico. El depósito tiene color ocre y la potencia se calcula entre 2 y 4 m. Al igual que a los fondos de valle, se les asigna una edad Holoceno.

**2.2.2.7. Gravas, cantos y bloques (Barras), (nivel 529). Holoceno.**

Las barras aparecen relacionadas con el río Ebro, ocupando parte de su cauce activo. En ellas se pueden observar, sobre todo en la fotografía aérea, las cicatrices de acreción lateral que indican su crecimiento. Son depósitos con pocos finos, al menos superficialmente, porque al estar situadas en la parte activa del cauce, son lavadas por las aguas. Se les asigna una edad Holoceno.

### 3. TECTONICA

La Hoja a escala 1.25.000 de Tudela (282-IV) se localiza en el “sector occidental de la cuenca del Ebro”, muy próxima a la Cadena Ibérica. Esta cuenca constituye un área de sedimentación terciaria de geometría triangular que se comporta como cuenca de antepaís respecto al orógeno pirenaico.

La estructura de Cuenca del Ebro y de las cadenas alpinas que la limitan (Pirineos al N, Cordillera Ibérica al S y Catalánides al E) es el producto de la convergencia de las placas Ibérica y Europea, comenzada hacia finales del Cretácico, y continuando durante buena parte del Terciario, hasta el Mioceno.

Esta compresión entre dichas placas, dio lugar, en la vertiente surpirenaica, a un conjunto de láminas cabalgantes hacia el S., mientras que en el margen contrapuesto, la compresión provoca el cabalgamiento de la Sierra de la Demanda, con un desplazamiento de 20-30 km. hacia el Norte, y de la Sierra de Cameros.

La deformación producida se desplaza de forma heterócrona hacia el Oeste a lo largo del trazado de la cadena, que enlaza en este sentido con la Sierra de Cantabria-Montes Obarenes y Cordillera Cantábrica.

Tectónicamente, la Cuenca del Ebro está formada por un basamento rígido y una cobertera formada por materiales continentales terciarios plegados, con importantes acumulaciones de evaporitas que facilitan los despegues y los procesos halocinéticos, especialmente en zonas centrales de la cuenca. Esta cobertera ha sufrido el empuje de los cabalgamientos frontales del borde pirenaico en su margen septentrional y del sistema ibérico en su margen meridional, como se puede comprobar en los cuadrantes colindantes de Grávalos (281-II) y Cervera del río Alhama (281-IV)

La colisión de placas finalizó en el Luteciense, durante el Eoceno, momento en el que se produce la denominada Fase Pirenaica, aunque el régimen compresivo continuó hasta el Mioceno.

Con la culminación de esta se produjo el acercamiento definitivo entre las placas Ibérica y Europea. El resultado de esta colisión dio lugar, en la cadena pirenaica, a un cinturón de pliegues y cabalgamientos, agrupados en las denominadas láminas cabalgantes (mantos), que se propagó hacia el antepaís.

A partir del Eoceno superior y durante el Oligoceno inferior emergen los cabalgamientos de basamento de la zona axial pirenaica sobre las rocas de la cobertera deformada, lo que motiva el principal desplazamiento de las láminas cabalgantes surpirenaicas sobre la Cuenca de Ebro.

La traslación del conjunto hacia el Sur facilita la emergencia de la rampa frontal del cabalgamiento surpirenaico y se evidencia por la deformación interna y progresiva de los depósitos clásticos terciarios, con la creación de sistemas de pliegues y cabalgamientos en las series paleógenas.

Durante el Oligoceno superior y Mioceno inferior se verifica el emplazamiento definitivo del Manto de Gavarnie, originando una serie de estructuras plegadas y/o cabalgantes a lo largo del frente surpirenaico. En consecuencia, la propagación de despegues no emergentes hacia la cuenca de antepaís pasiva (Cuenca del Ebro) motiva la migración de los depocentros sedimentarios hacia el Sur.

En esta zona de la Cuenca, en cuya parte noroccidental, se enmarca la zona de estudio, el plegamiento tuvo lugar en el Mioceno inferior a medio.

Durante este período se produjo el plegamiento de la cuenca navarro-riojana como resultado de la etapa principal de compresión pirenaica. Se desarrollaron extensos pliegues de dirección NO-SE, que compartimentaron la cuenca en diferentes dominios sedimentarios, situados en los surcos sinclinales, más o menos independientes entre sí, desplazándose los grandes sistemas lacustres evaporíticos de centro de cuenca, característicos de la etapa anterior, hacia el sector aragonés, convirtiéndose el sector navarro-riojano en una zona de sedimentación principalmente detrítica tanto en el margen ibérico como en el pirenaico.

El resultado del plegamiento en esta zona es un conjunto de pliegues de gran longitud de eje y flancos comparativamente cortos, dispuestos en dirección NO-SE y vergentes al Sur, que definen el denominado Dominio Plegado del Ebro, del cual la Hoja que nos ocupa se sitúa al Sur.

De la información de subsuelo existentes, especialmente líneas sísmicas próximas y el sondeo Marcilla-1, emplazado en la Hoja de Peralta (nº 206-IV), indica que los principales anticlinales corresponden a cabalgamientos ciegos hacia el SSO, relacionados con pliegues de crecimiento. Los niveles de despegue están representados por formaciones evaporíticas terciarias, especialmente los Yesos de Falces, bajo los que se encuentra la serie terciaria autóctona en disposición claramente tabular.

A diferencia del Dominio Plegado del Ebro, en toda esta zona situada más hacia el Sur no existen fenómenos tectónicos que hayan afectado a las unidades detríticas miocenas. Únicamente se constata un buzamiento de 2-5° hacia el SSE. Esta ligera inclinación esta propiciada por la disposición sedimentaria y la ubicación regional.

En toda esta zona, las huellas de plegamiento del Dominio plegado del Ebro únicamente se reconocen en la contigua Hoja de Murillo de la Limas, en la unidad de los Yesos de Los Arcos donde se muestra una cierta tectónica, al formar parte del cierre periclinal del anticlinal de Arguedas.

Este anticlinal de Arguedas se extiende desde las proximidades de Lodosa hasta su terminación en la hoja de Los Hermanos, con una dirección aproximada N120°E, y vergencia aparentemente hacia el sur.

A pesar de su proximidad a la banda plegada de la Cadena Ibérica, situada al oeste, en la cercana Hoja de Cervera del Río Alhama, y, así mismo, muy próxima a los relieves ibéricos del Moncayo, el resto de materiales asociados al Terciario continental en esta Hoja, no presentan estructuración, solo un suave buzamiento hacia el SE que da lugar a series monoclinales, no reconociéndose ninguna otra estructura de carácter tectónico.

## **4. GEOMORFOLOGÍA**

### **4.1. DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA**

La superficie representada por la hoja de Tudela (282-IV), a escala 1:25.000, se localiza en el sector meridional de la Comunidad Autónoma de Navarra y abarca parte de dos comarcas muy diferentes: La Rioja, al sur y oeste, y Las Bardenas Reales, al noreste.

La zona pertenece a la Depresión del Ebro, cuenca sedimentaria de forma triangular rellena durante el Terciario y limitada, al norte por los Pirineos y los Montes Vasco-Cantábricos, al sur por la Cordillera Ibérica y al este por la Cordillera Costero-Catalana. Dentro de la cuenca, se enmarca en su sector suroccidental, denominado Cuenca de La Rioja-Navarra (RIBA et al., 1983) o Cubeta Navarro-Riojana (ORTÍ, 1990) y caracterizada, por un conjunto de sedimentos plegados y posteriormente modelados por la acción de los procesos externos.

La geomorfología de la hoja ofrece tres áreas de características diferentes. La primera ocupa parte del cuadrante noreste de la hoja y corresponde a los Relieves tabulares de Las Bardenas Reales, área caracterizada por un territorio árido, escasamente vegetado y modelado de forma caprichosa por el agua y el viento, donde destacan una incisión generalizada y una arroyada de gran importancia. La segunda, más extensa, es la representada por el Valle del Ebro que forma una amplia banda que atraviesa la hoja de noroeste a sureste. La tercera, en el cuadrante suroeste, está constituida por un conjunto de depósitos de piedemonte que sirven de enlace entre los relieves más orientales de los Picos de Urbión y el Valle del Ebro.

La red fluvial se ordena en torno al río Ebro, al que afluyen cauces de escasa relevancia pues se trata de cursos efímeros, funcionales estacionalmente, pero entre los que hay que destacar el río Madre de Viosas que desarrolla una amplia llanura de inundación. Hay que señalar la presencia del Canal de Lodosa que con sus aguas contribuye a mejorar los regadíos de una gran parte de la superficie de la región.

Climatológicamente pertenece al tipo Mediterráneo Templado Occidental, caracterizado por lluvias escasas y esporádicas, veranos calurosos e inviernos fríos. Se trata de una zona árida y esteparia donde las precipitaciones varían entre los 400 y 500 mm. La temperatura media anual oscila entre los 13 y 14 °C, con épocas en las que se alcanzan los 50 °C de máxima y otras con -5 °C de mínima. El viento también es un elemento clave en la Bardenas sobre todo en las zonas deforestadas. Se trata del cierzo, un viento helador en invierno y moderado en verano que se produce por las diferencias entre las altas presiones del Cantábrico, Europa o la Meseta y las bajas del Mediterráneo. En esta zona esteparia, entre el Moncayo y los Pirineos, el cierzo suele soplar en dirección NO-SE, alcanzando con facilidad los 70 km/h, aunque puede llegar hasta 120 km/h.

Es una zona muy bastante poblada, donde existe un importante núcleo urbano, Tudela, seguido de otros de menor tamaño como Cabanillas, Murchante o Fontellas. La agricultura constituye la principal ocupación de sus habitantes, alrededor de la cual se han originado una serie de industrias relacionadas con la alimentación, actualmente en expansión. También hay que añadir la ganadería de ovino, las explotaciones forestales y el desarrollo del turismo rural, sobre todo en la región de las Bardenas Reales.

Las vías de comunicación son excelentes, destacando la AP-68 que une Zaragoza con Bilbao y las carreteras nacionales N-232 y N-121-C. Existen, además numerosas carreteras comarcales y locales que ponen en comunicación los diversos núcleos de población entre sí. El resto de la red viaria se reduce a un entramado de caminos y pistas, muy numerosos, que permiten el acceso a la práctica totalidad de la Hoja.

## **4.2. ANTECEDENTES**

Los trabajos de índole geomorfológica llevados a cabo en este sector de la Depresión del Ebro, son muy escasos. Sin embargo, existen una serie de estudios de carácter general entre los que hay que señalar el de GUTIÉRREZ y PEÑA (1994) que trata la totalidad de la cuenca en el marco del libro "Geomorfología de España", así como el Mapa Geológico de la Comunidad de Navarra a escala 1:200.000 (GOBIERNO DE NAVARRA, 1997).

Respecto a estudios más concretos, la mayoría se basan en los depósitos de terrazas y glaciares del río Ebro, destacando los de RIBA y BOMER (1957), GONZALO (1977 y 1979), LERANOZ (1989) y LERANOZ (1990 a) que aborda el endorreísmo del sector meridional navarro. Por su interés neotectónico es preciso señalar la publicación de ATARES et al. (1983), en relación con la existencia de fallas cuaternarias en el área de Alcanadre. También, por su relación directa con la zona de estudio, son considerables los trabajos de MENSUA y BIELZA (1974) y LERANOZ (1990 b) centrados en el curso bajo del río Ega y en el Ebro

También es preciso destacar las aportaciones de las hojas geológicas, a escala 1:50.000, correspondientes al Plan MAGNA, especialmente las de Alfaro (244) y Tudela (282). Por último, mención aparte merecen las hojas geológicas y geomorfológicas, a escala 1:25.000, realizadas dentro del "Proyecto de actualización e informatización de la cartografía geológica de Navarra", llevado a cabo por GOBIERNO DE NAVARRA en años sucesivos, por la gran cantidad de datos aportados y la puesta al día en el conocimiento geológico de la región.

### **4.3. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO**

El estudio morfológico que aquí se realiza ha sido abordado desde dos puntos de vista muy diferentes. Por un lado, considerando el relieve como algo estático, es decir, como una consecuencia del sustrato geológico y de la disposición del mismo (estudio morfoestructural) y por otro, desde la dinámica que supone la incidencia de los procesos exógenos sobre dicho sustrato (estudio del modelado).

#### **4.3.1. Estudio MORFOESTRUCTURAL**

##### **4.3.1.1. Formas estructurales**

La superficie que representa la hoja de Tudela (282-IV) se localiza en la Cuenca de La Rioja-Navarra, perteneciente a la Depresión del Ebro. Dicho sector está caracterizado por una clara influencia de la estructura en el relieve. De acuerdo con los rasgos

geológicos regionales, son las rocas sedimentarias las que terciarias integran el sustrato, modelado posteriormente por los agentes externos.

El dominio terciario, atribuido al Mioceno inferior-medio, está caracterizado por dos conjuntos litológicos, la Formación Tudela, arcilloso-calcárea, predominando las arcillas de colores pardo-amarillentos con bandas blanquecinas y la Formación Alfaro, constituida por arcillas, limos y areniscas de colores rojos. Como ambas formaciones contienen capas de diferente dureza y resistencia a la erosión, además de una disposición horizontal o subhorizontal, configuran un relieve en el que destacan superficies, replanos y resaltes estructurales de los niveles más competentes. Estos niveles son los que permiten definir la estructura regional, consistente en una sucesión tabular que denuncia una serie de pliegues suaves, correspondientes a grandes estructuras.

Los resaltes poseen una continuidad muy variable y pueden aparecer como simples escarpes, más o menos pronunciados pero, en todos los casos, inferiores a 100 m. También se conservan superficies estructurales y cerros cónicos. Las superficies estructurales de mayor amplitud son las que se encuentran en los parajes de Corraliza de Arguedas, San Gregorio y Serralta en el cuadrante noreste de la hoja.

#### **4.3.2. Estudio del modelado**

El relieve de la zona es el resultado de la acción de los procesos externos, tanto erosivos como sedimentarios, sobre la estructura existente al finalizar el Terciario. Dichos procesos tienen génesis diversas: gravitatoria (de laderas), fluvial, poligénica, endorreica y antrópica.

##### **4.3.2.1. Formas de ladera**

Están representadas única y exclusivamente por los coluviones que parecen dispersos por toda la superficie de la hoja y. Tienen formas alargadas, más o menos estrechas y se disponen paralelamente a los escarpes o a los ríos, pero siempre al pie de las laderas.

Los mejores ejemplos se pueden observar en el sector central, al sur de la localidad de Tudela.

#### **4.3.2.2. Formas fluviales**

Las formas fluviales de carácter sedimentario, están representadas por fondos de valle, llanuras de inundación, terrazas, conos de deyección, cauces abandonados y barras de acreción lateral. Las erosivas las constituyen la incisión fluvial, los escarpes, las cárcavas y sus respectivas cabeceras, la incisión lineal y la arroyada.

Los fondos de valle se desarrollan por toda la superficie de la hoja cubriendo el fondo de algunos pequeños barrancos y arroyos que desaguan directamente al Ebro. Su génesis da lugar a formas alargadas y estrechas que eligen direcciones de debilidad o de adaptación a las estructuras dominantes. Los de mayor tamaño se encuentra en la mitad sur de la hoja, mientras que los más estrechos son los del sector nororiental, en la región de las Bardenas.

Por lo que respecta a los depósitos de llanura de inundación, los únicos existentes son los del río Madre de Viosas que con una dirección casi oeste-este, desagua en el Ebro junto a Tolosa. Morfológicamente tiene una superficie extremadamente plana, su trazado es algo curvilíneo, la anchura es aproximadamente de 700 m, y el grado de encajamiento casi nulo.

Las terrazas pertenecen en su mayoría al río Ebro, pero algunos afloramientos corresponden al valle del Madre de Viosas. Considerándolas en su conjunto, se han reconocido cinco niveles, dentro del ámbito de la hoja, situadas a las siguientes cotas: +5-8 m, +10-20 m, +25-30 m, +90-100 m, +130-140 m. Los dos niveles inferiores se han consideran como terrazas “bajas” y poseen un dispositivo morfológico de solapadas o encajadas, el nivel de +25-30 m, corresponde a terrazas “medias” y ,el resto, son terrazas “altas”. Los últimos niveles ofrecen un dispositivo diferente, pues sus depósitos están colgados respecto a los cauces actuales y, por debajo de ellos pude verse, de forma clara, el sustrato terciario subyacente.

La terraza baja es la que alcanza un mayor desarrollo superficial y el resto de ellas, dispuestas escalonadamente, quedan limitadas por una serie de escarpes producidos en el proceso de encajamiento de la red fluvial. Los escarpes de las terrazas bajas, ofrecen una mayor continuidad superficial y son más netos, mientras que los pertenecientes a las terrazas altas y medias son de morfología más recortada y algo más suavizados.

Uno de los rasgos que puede observarse en las terrazas de este sector es su inclinación hacia los cauces principales. Este fenómeno se debe a la proximidad de los relieves que hacen que los cursos de agua desciendan con gran pendiente, dando estas formas que podrían incluirse en la denominación de glacia-terrace. En otras zonas del valle del Ebro, se mencionan colapsos, basculamientos y plegamientos debidos a la presencia de yesos por debajo de las terrazas.

Asociados a las terrazas "bajas" se presentan un conjunto meandros abandonados, con su típica forma arqueada, que dan noticia de los desplazamientos del curso de agua en las últimas etapas de la evolución del río Ebro. Las barras aparecen relacionadas con los ríos principales, ocupando parte de su cauce activo. En ellas se pueden observar, sobre todo en la fotografía aérea, las cicatrices de acreción lateral de las mismas.

También se han cartografiado algunos conos de deyección en el valle del Ebro y en algunos valles secundarios. Estos se generan cuando la carga concentrada en arroyos y barrancos alcanza áreas más amplias, expandiéndose y dando lugar a depósitos con morfologías en abanico. En general, se trata de formas aisladas con diferentes tamaños que a veces se suelen presentar disectados por los sucesivos procesos de encajamiento de la red.

Por lo que se refiere a las formas erosivas cabe decir que son muy frecuentes en esta parte del territorio navarro. El predominio de sedimentos blandos favorece el desarrollo de la incisión y la formación de algunas aristas en la margen norte del río Ebro, sobre los sedimentos del Terciario. También son considerables la arroyada y las cárcavas, con sus correspondientes cabeceras, en el sector noreste de la hoja donde la naturaleza es más arcillosa.

#### **4.3.2.3. Formas endorreicas.**

Se forman en áreas de topografía muy suave y de sustrato impermeable. Los fondos endorreicos, aquí cartografiados, son de pequeño y mediano tamaño, con formas ovaladas y alargadas. La mayor parte se desarrolla en fondos aluviales donde la pendiente es muy llana y además existe un sustrato impermeable.

#### **4.3.2.4. Formas poligénicas**

Se trata de formas con una importante representación superficial y muy diversas, merced a las características litológicas y climáticas de la región. En la hoja se han reconocido glaciares de cobertera y depósitos de aluvial-coluvial.

Los glaciares de cobertera aparecen como depósitos de gran extensión superficial que desde el suroeste se dirigen hacia el río Ebro. Tienen formas palmeadas y alargadas que se abren hacia las zonas más bajas, con perfiles longitudinales plano-cóncavos que aumentan su concavidad hacia la cabecera. Los más destacados ocupan el cuadrante suroeste de la hoja y están disectados por la red de incisión dando lugar a escarpes netos. Se reconocen dos niveles con un importante grado de encajamiento del más reciente en el más antiguo.

Por lo que se refiere a los depósitos de origen aluvial-coluvial, cabe decir que son poco frecuentes. Se forman en valles amplios, muy poco encajados, en los que resulta difícil delimitar los depósitos de origen fluvial y los procedentes de las vertientes. Tienen escasa relevancia en cuanto a su potencia, y se adaptan groseramente a la forma de los valles.

#### **4.3.2.5. Formas antrópicas**

La actividad antrópica constituye una faceta de interés en la zona, centrada en el sector agropecuario y en las explotaciones. En la hoja de Tudela solamente se han significado una serie de canteras al este de la hoja, en las terrazas del Ebro, de donde se extraen áridos para la construcción.

#### 4.4. FORMACIONES SUPERFICIALES

Se consideran como tales todas aquellas formas con depósito, consolidado o no, que pueden sufrir una consolidación posterior y que están relacionadas con el relieve que se observa en la actualidad (GOY et al., 1981). La principal característica es su cartografiabilidad y se definen por una serie de atributos como litología, geometría, textura, potencia, tamaño, génesis y cronología, siempre que sea posible.

Las formaciones superficiales de ladera están constituidas exclusivamente por coluviones. Son depósitos de reducido espesor, en general inferior a 2 m, con cierta representación superficial y distribuidos irregularmente, aunque siempre al pie de las laderas. Su constitución litológica depende directamente de la naturaleza de los materiales que existan en la parte alta de las laderas. Predominan las lutitas y arenas con cantos y bloques angulosos a subangulosos de areniscas de tamaño muy variable y, con frecuencia, de orden decimétrico. Por su posición con respecto al relieve y su relación con el resto de los depósitos cuaternarios, se han asignado al Holoceno.

Por lo que se refiere a las formaciones superficiales de carácter fluvial, son las terrazas las que alcanzan mayor desarrollo. La litología es muy similar en todas ellas, si bien la granulometría y el grado de cementación por carbonatos, ofrece ligeras variaciones. En general, están formadas por gravas polimícticas con arenas y lutitas en proporción variable, predominando los clastos redondeados, de naturaleza silíceo (cuarcitas, cuarzo, areniscas, liditas) y carbonatada (Calizas con foraminíferos, dolomías y calcarenitas). Cuando aparecen cementaciones, se presentan como auténticos conglomerados. El tamaño de los clastos es diverso y, en ocasiones, se observan dos modas. En las terrazas altas, aunque el tamaño medio está comprendido entre 10 y 20 cm, se pueden alcanzar dimensiones hasta de 40 cm. En las terrazas bajas la media es inferior, entre 6 y 10 cm, con máximos de 15 cm. Los espesores son muy irregulares, por lo general de 3-5 m, con valores algo superiores en las terrazas altas. Son relativamente frecuentes los cuerpos arenosos con estratificaciones cruzadas de surco. En las gravas, se observan también imbricaciones de cantos y estratificaciones cruzadas. Su edad abarca desde el Pleistoceno inferior al Pleistoceno superior.

Los fondos de valles están constituidos por los depósitos que deja el agua en arroyos y barrancos. Tienen formas alargadas y estrechas y se adaptan a la estructura de la red drenaje. En ellos predominan las lutitas grises y ocre que contienen clastos de diferentes tamaños y naturaleza, incluso bloques. En menor medida, también, se observan niveles de arenas. La naturaleza de los clastos varía según la procedencia, pero, en esta zona, suelen ser de areniscas y algunas calizas. La potencia, casi nunca visible en su totalidad, se estima entre 3 y 5 m. Por su relación con la red fluvial actual, se les supone una edad Holoceno.

También a este grupo pertenece la llanura de inundación del río Madre de Viosas, al noroeste de la hoja. Se trata de una llanura de inundación constituida mayoritariamente por elementos finos, arenas y limos, con algunos niveles de cantos, procedentes del terciario detrítico. El depósito tiene color ocre y la potencia se calcula entre 2 y 4 m. Al igual que a los fondos de valle, se les asigna una edad Holoceno.

Los conos de deyección están formados por limos y arenas que engloban delgados niveles de cantos. Localmente se observan cementaciones pero muy delgadas y de muy poca consistencia. La potencia varía dentro del mismo cono, siendo mayor en la zona apical, para adelgazarse hacia la zona distal. Al ser su material transportado por los cauces, la naturaleza de sus componentes dependerá mucho de la litología del área madre, pero por la posición que aquí ocupan, puede decirse que proceden de las formaciones lutíticas terciarias y de los grandes glacis.

Los meandros abandonados tienen una litología similar a la de las terrazas, pero al formar un pequeño surco en las mismas, suelen inundarse temporalmente, sobre todo en épocas de lluvia, por lo que se puede producir una acumulación de material fino e incluso procesos de carácter endorreico.

Las barras de acreción lateral, por el contrario, tienen pocos finos como consecuencia de su posición en la parte activa del cauce, Este hecho genera el lavado del depósito, en épocas en las que los cursos aumentan su nivel. Tanto los cauces abandonados como las barras se relacionan con las últimas etapas de la evolución de la red fluvial, por lo que se les asigna una edad Holoceno.

Las formaciones superficiales de origen endorreico son de escasa importancia y están constituidas por depósitos finos asociados a áreas de drenaje deficiente en las que se producen encharcamientos. Se trata de arcillas grises y limos con un moderado contenido en materia orgánica y que en general poseen un espesor inferior a 1 m. Ocasionalmente pueden intercalar depósitos más groseros suministrados por los barrancos que alcanzan la depresión. Por su disposición dentro del relieve actual se han atribuido al Holoceno.

Finalmente se describen las formaciones superficiales de origen poligénico, integradas por glaciares y aluviales coluviales. Los primeros son glaciares de cobertera desarrollados sobre depósitos neógenos, preferentemente arcillosos y areniscosos con una composición que refleja la naturaleza de los relieves al pie de los cuales se generan. Se presentan en dos niveles y están constituidos por conglomerados con gravas de litología variada y muy heterométricas, a veces con bloques de hasta 50 cm y con una potencia que no suele superar los 5 m. En algunos cortes se observan estratificaciones planares y en surco y lentejones de arena. La matriz suele ser limoso-arenosa, bastante abundante y hay importantes encostramientos, sobre todo en los niveles más altos. En cuanto a su edad, por la relación que en esta y otras áreas tienen con los niveles de terraza, pueden considerarse Pleistoceno inferior- Pleistoceno superior

Los aluviales-coluviales son depósitos de origen mixto, característicos de valles poco encajados, en los que resulta extremadamente difícil discriminar entre la parte derivada de un origen fluvial y la que posee un origen gravitacional. Ya que se trata de depósitos muy localizados, su composición presenta escasas variaciones, reflejando, en cualquier caso, la del sustrato donde se desarrollan, por ello predominan los términos lutíticos con delgadas hiladas de cantos de calizas y arenisca, así como niveles de arenas. Su espesor, difícil de establecer, debe oscilar entre 2 y 5m. Lógicamente, se les ha asignado la misma edad que a los depósitos de fondo de valle y a los coluviones, es decir, Holoceno.

#### 4.5. EVOLUCIÓN DINÁMICA

La evolución geomorfológica de una zona es difícil de analizar sin integrarla en un ámbito regional más amplio, por ello se debe considerar esta hoja de Tudela en el contexto de la Depresión del Ebro.

En hojas próximas se habla de la existencia de alguna superficie de erosión que aparece claramente encajada en las superficies de los sistemas montañosos que bordean la cuenca del Ebro y, aunque poco puede precisarse sobre el modelado finieógeno en esta zona debido a la ausencia de depósitos del intervalo Mioceno superior-Plioceno, parece probable la pertenencia de aquéllas al Cuaternario. Estas superficies constituirían el nivel de arranque del encajamiento de la red fluvial y por tanto, el inicio del desmantelamiento del relieve finiterciario. En la hoja de Tudela, no se observa huella ninguna de estas superficies pero se considera que el proceso se inició a comienzos del Cuaternario, conducido por los agentes externos.

Dentro del Cuaternario, el episodio sedimentario más antiguo está representado por los glaciares de techo de piedemonte, procedentes de los relieves de los sectores septentrional y oriental, probablemente de edad Pleistoceno inferior. Estos glaciares se pueden observar, con un magnífico desarrollo, en las contiguas hojas de Cintruénigo (282-I) y Murillo de las Limas (282-II), siendo su resultado morfológico, una superficie ligeramente inclinada hacia el valle del Ebro. Estos glaciares representan el primer encajamiento de la red fluvial, principal agente modelador de la zona que lleva aparejados una serie de procesos denudativos y sedimentarios que dan lugar a las terrazas. La erosión vertical de la red, acompañada por un retroceso de las laderas, ha favorecido los procesos gravitacionales.

En el ámbito de la hoja, una vez generado el glaciar de techo de piedemonte, la red fluvial que, en una acción remontante, progresaría desde el ámbito del río Ebro hacia el Norte y desde el del río Aragón hacia el sur. A mediados del Pleistoceno, el modelado se caracterizaría por el desarrollo de diversos glaciares, estableciéndose un sistema diferente para cada una de las cuencas.

En el Holoceno, la dinámica fluvial ha seguido gozando de una gran preponderancia en el modelado de la región, tanto por la acción llevada a cabo en los fondos de los valles, como por la ejercida en las laderas. En cuanto a los depósitos de las mismas, permanecen conservados en forma de coluviones. Localmente, las deficiencias en el drenaje han permitido la instalación de áreas endorreicas y la acción humana, la acumulación de materiales antrópicos, si bien en ambos casos se trata de procesos de poca envergadura

La influencia del sustrato también ha sido puesta de manifiesto por la profusión de superficies estructurales, escarpes, mesas y cerros cónicos que la erosión ha modelado y que constituyen elementos inseparables del paisaje actual en la región.

#### **4.6. MORFOLOGÍA ACTUAL-SUBACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS**

La fisonomía actual de la hoja de Tudela (282-IV) es debida fundamentalmente a dos factores, la estructura del sustrato y la acción erosiva y sedimentaria producida durante el Cuaternario y encabezada por la dinámica fluvial.

En general, la red de drenaje se encaja mediante procesos de incisión vertical, muy evidentes en las zonas abruptas y en el sector de Bardenas Reales, al noreste de la hoja. Estos procesos van acompañados por retroceso de las laderas y desarrollo de cárcavas. La previsible evolución del relieve a corto plazo no sugiere modificaciones importantes en relación con los procesos actuales, a excepción de Las Bardenas, siendo de esperar una tendencia general de aproximación del relieve al nivel de base local, marcado por el río Ebro. Si bien en las áreas de afloramiento de materiales blandos se acentuarán las tendencias endorreicas, la superior resistencia a la erosión de algunos niveles podría exagerar los desniveles asociados con algunas formas estructurales.

## 5. HISTORIA GEOLOGICA

La Hoja a escala 1:50.000 de Tudela, de la que forma parte el cuadrante 282-II, Murillo de las Limas, se sitúa en el centro de la Depresión del Ebro, y dentro de esta, se ubica en la denominada Cuenca Navarro-Riojana (SALVANY, 1989) que constituye una subcuenca de la cuenca del Ebro.

Teniendo en cuenta las distintas unidades caracterizadas en esta Hoja y las hojas limítrofes, en este apartado se va a tratar de ajustar una síntesis paleogeográfica y evolutiva que de idea de la historia geológica de esta zona.

La depresión del Ebro es una de las grandes cuencas terciarias peninsulares junto con las cuencas del Duero y la del Guadalquivir, La evolución paleogeográfica de la cuenca del Ebro, en la época terciaria, estuvo controlada por el régimen tectónico, manteniéndose activa desde el Paleoceno hasta el Mioceno terminal. Esta actividad tectónica varia la configuración geográfica a lo largo del tiempo en función del levantamiento de las cordilleras limítrofes: Pirineos al Norte, la Ibérica al Sur y las Catalánides hacia el Este. De todas estas cordilleras; la mayor influencia en la paleogeografía de la Depresión del Ebro se debe al levantamiento de la Cadena Pirenaica, que se ha levantado cabalgando los depósitos terciarios. Respecto a esta cadena, la Depresión del Ebro se comporta como cuenca de antepaís meridional a lo largo del Terciario.

La compresión se inicia en el Cretácico Superior en las zonas más orientales de la cuenca, desplazándose hacia el Oeste progresivamente.

A finales del Eoceno se produce, en la cuenca de antepaís surpirenaica, la retirada definitiva del mar hacia el Oeste debido al levantamiento de la cadena Pirenaica. La depresión del Ebro se convierte en una cuenca endorreica que registra un importante acumulo de materiales continentales aluviales y lacustres, situación que se mantiene hasta bien entrado el Mioceno. La interrupción de la comunicación con el mar marca el inicio del Oligoceno, a partir del cual se generaliza la sedimentación continental en la Cuenca, situación que se mantiene hasta la actualidad.

El análisis secuencial de la sucesión terciaria continental ha dado como resultado el establecimiento de una serie de ciclos sedimentarios, delimitados por propagaciones aluviales bruscas hacia el Sur relacionadas con impulsos tectónicos en los márgenes. Cada ciclo tiende a organizarse, en términos generales, de acuerdo con un episodio de actividad diastrófica menguante dando lugar a una secuencia estrato y granodecreciente. No obstante algunos ciclos tienden a organizarse de forma contrapuesta o compleja.

En conjunto se evidencia una migración mantenida hacia zonas más meridionales del surco de sedimentación aluvial, a consecuencia del empuje de la cadena en el mismo sentido. Esta circunstancia, unida a una probable progresión de la actividad diastrófica da como resultado una secuencia negativa general, de tendencia estrato y clastocreciente, con desarrollo de facies aluviales cada vez más proximales hacia techo y a la aparición de series más modernas hacia el Sur.

Durante los inicios del el Oligoceno superior, en esta zona de la Cuenca del Ebro, la sedimentación se concreta a partir de sistemas aluviales procedentes de los relieves pirenaico e ibérico, que pasan, a distancia creciente de los márgenes, a contextos lacustres salinos. El predominio de ambos ambientes es alternante a lo largo del Terciario, aunque cada vez con mayor influencia de los primeros en el Mioceno, de modo que se suceden los episodios generalizados de propagación aluvial, relacionados con impulsos diastróficos, y las etapas de expansión lacustre, caracterizadas por extensos cuerpos evaporíticos en el registro sedimentario.

Las áreas lacustres evaporíticas, desarrolladas de forma amplia en los sectores centrales de la cuenca, han experimentado una migración mantenida hacia el Sur, como consecuencia del levantamiento del Pirineo y de la progradación de los sistemas aluviales procedentes de este, parte de los cuales se reconocen en la zona de estudio o bien en áreas próximas.

La Hoja de Tudela se sitúa en el sector central de la cuenca y Ebro y está representada por materiales terciarios y cuaternarios de origen continental. La historia geológica de estas hojas que se desarrolla a continuación se establece de acuerdo con los datos obtenidos en la Hoja y con los del entorno próximo

En el tránsito entre el Oligoceno Superior y el Mioceno Inferior se registran variaciones sucesivas en la configuración de la paleogeografía de la Cuenca Navarro-Riojana que se traducen estratigráficamente en una alternancia entre unidades detríticas y evaporíticas de gran continuidad, (SALVANY, 1989), configurando en conjunto la Fm. Lerín, formada por alternancia de ciclos evaporíticos, (Alcanadre, facies yesíferas de Peralta y Sesma, y Yesos de Los Arcos), y ciclos de carácter detríticos (facies detríticas de Peralta, Sesma y Arcillas de Villafranca):

Los episodios de propagación aluvial están representados durante el Mioceno por las unidades de Olite, Artajona y Ujúe también conocidas como Facies de Allo, Sos y San Martín de Unx. Hacia el Sur y Suroeste acontecen episodios algo similares a finales del Paleógeno y comienzos del Mioceno en la Fm. Lerín, que incluye a veces desarrollos evaporíticos importantes.

Los materiales terciarios que presenta la Hoja de Tudela son de edad Mioceno y representan los últimos episodios del relleno de la cuenca de antepaís Surpirenaica, o cuenca del Ebro mediante episodios de propagación aluvial. Este desarrollo aluvial esta representado, desde el oeste ibérico, por la Fc. Fitero, formado por facies proximales, que agrupa el conjunto de materiales aluviales y fluviales desarrollados en el margen ibérico de la cuenca navarro-riojana durante el Mioceno inferior, la facies Cascante, que constituye una unidad detrítica que representa las facies intermedias de los abanicos, y por último, dos formaciones litoestratigráficas, la Fm. Alfaro y la Fm. Tudela, de carácter aluvial y lacustre respectivamente. Ambas formaciones son equivalentes lateralmente y constituyen los depósitos más distales de estos abanicos.

Estos depósitos se corresponden con dos sistemas aluviales contemporáneos (sistem stack); uno de procedencia N (Ujúe - Tudela) y otro de procedencia Sur (Fitero - Tudela); ambos de carácter "stream dominated" (abanicos aluviales húmedos, sensu SCHUUM, 1977) que desembocan en una cuenca lacustre de tipo perenne. Se apoyan discordantemente sobre las unidades anteriores (discordancia fini-Oligocena).

Durante este período, los sistemas aluviales presentan una disposición axial submeridiana y se generan facies aluviales proximales indicativas claramente ya del

desplazamiento hacia el Sur del margen de la cuenca (Unidad de Olite y Facies Las Bardenas) y más claramente de manifiesto durante el Mioceno, en las Sierras de San Pedro-Peña situadas más al Norte de la Hoja.

Los primeros registros que aparecen en estas Hojas corresponden a los depósitos evaporíticos de la Fm. Los Arcos.

La sedimentación de la Fm Alfaro y Tudela, y sus equivalentes, Fm. Olite y Miranda de Arga, se localizan por toda la zona y fuera ya de ella en los sinclinales de Miranda de Arga y en la continuación hacia el Oeste del de Peralta. Hacia el Oeste, se expande la Unidad de Olite, estando representada por facies aluviales distales. Esta, se acuña hacia el Sur por su disposición en *on lap* y por tránsito en vertical a las Unidades de Miranda de Arga, que incluyen niveles lacustres carbonatados.

Se producen en consecuencia, durante los tiempos miocenos una marcada reestructuración paleogeográfica en la cuenca que queda cubierta por facies aluviales con el desplazamiento de la sedimentación evaporítica lacustre (Yesos de Zaragoza) hacia el Este. Las facies aluviales más progradantes y proximales de procedencia pirenaica se encuentran aflorantes en las Sierras de San Pedro y Peña y tienen sus equivalentes laterales en la Unidad de Artajona y se sitúan por el S y SE. sobre la Unidad de Olite y sobre las Facies de Las Bardenas.

En la zona de la Hoja de Tudela, los depósitos de atribución correlativa están integrados por las Fms. Fitero, Cascante y Alfaro, que en esta zona están representados por lutitas rojas y ocreas con intercalaciones de canales de conglomerados (equivalente de la Fm. Cascante) y la Fm. Tudela por depósitos arcillosos con intercalaciones calcáreas.

La estructuración de este borde de la Cuenca del Ebro, acontece durante el Mioceno inferior-medio y se articula en una serie monoclinial, en clara discordancia progresiva de dirección NNO-SSE y vergencia al Suroeste y Sur como resultado de la última etapa importante de compresión pirenaica.

El plegamiento sinsedimentario es el responsable de la discordancia progresiva del borde de cuenca y por consiguiente de las discordancias internas reconocibles como p.e. la discordancia basal de la Unidad de Olite (Fm. Tudela) con su marcado carácter erosivo y la disposición en *on lap* hacia las principales estructuras anticlinales. También se encuentran relacionados con este plegamiento las notables diferencias de espesor observables de un flanco a otro de algunas estructuras como la del anticlinal de Falces y el sinclinal de Peralta y en definitiva de la compartimentación incipiente en la zona a favor de los surcos sinclinales.

El origen del plegamiento está relacionado con alguna de las fases de compresión pirenaica, pero su posterior evolución debe relacionarse también con la plasticidad de las evaporitas que se presentan en el núcleo, principalmente, y flancos de las estructuras anticlinales. Este hecho se fundamenta en las estructuras observadas en los distintos cortes a través de los anticlinales de Falces y Arguedas, fuera de la zona de estudio, donde se puede apreciar que las estructuras que presentan los yesos son totalmente diapíricas.

Por último cabe destacar que según estudios recientes, el principio del exorreísmo en la cuenca debió producirse en un momento próximo al Mioceno superior y como muy tarde en el Plioceno. En esos tiempos tiene lugar la apertura de la Depresión del Ebro al Mediterráneo, por lo que esta pasa a comportarse como una cuenca exorreica. Empieza la etapa de vaciado erosional con la instalación de sistemas aluviales y el progresivo encajamiento de la red hidrográfica. Estos procesos, unidos al desarrollo de las diversas formas de erosión, dan lugar a la actual configuración del relieve de la Cuenca del Ebro.

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE NAVARRA A ESCALA 1:25.000.

282-IV. Tudela

---

## **6. GEOLOGÍA ECONÓMICA**

### **6.1. RECURSOS MINERALES**

La actividad minera en el cuadrante a escala 1:25.000 de Tudela (282-IV), se inscribe especialmente en la extracción de arcillas para la importante industria cerámica de la zona. Así aparecen numerosos indicios de canteras de arcilla, y algunos de gravas.

En toda esta zona, desde hace años, se han instalado numerosas industrias relacionadas con la extracción de arcillas y su transformación en productos cerámicos. En la actualidad existen tres/cuatro industrias que explotan canteras de arcillas pertenecientes a la Fm. Alfaro.

#### **6.1.1. Minerales y Rocas Industriales.**

##### **6.1.1.1. Gravas**

En este cuadrante 282-IV aparecen 4 indicios de gravas, todos ellos abandonados. Como el resto de canteras de la zona, son canteras de dimensiones variables que benefician depósitos clásticos de las terrazas del Ebro.

Litológicamente corresponden a gravas heterométricas de cantos bien rodados con contenidos variables en matriz arenosa y arenoso-limosa. El tamaño de los cantos varía entre 2 y 20 cm y corresponden mayoritariamente a calizas del Terciario y Mesozoico, y en menor medida a cuarcitas y areniscas.

La potencia de los niveles de terrazas es normalmente de orden métrico a decamétrico, si bien puntualmente pueden alcanzar espesores mayores.

Presentan frentes de explotación de altura variable, en ocasiones de varias decenas de m con alturas comprendidas entre 3 y 10 metros.

### **6.1.1.2. Arcillas**

Los indicios de arcillas son muy numerosos en la Hoja de Tudela, con varias canteras que explotan los depósitos rojos de la Fm. Alfaro para su utilización en la importante industria cerámica existente en Tudela y otras que lo hacen de forma esporádica

Ojo.....

## **6.2. HIDROGEOLOGIA**

### **6.2.1. Introducción**

En este apartado se describen las características hidrogeológicas de las distintas unidades de la Hoja a escala 1:25.000 nº 282-IV correspondiente a Tudela, y se establecen las características hidrogeológicas de distintas unidades acuíferas que aparecen.

### **6.2.2. Descripción de las FORMACIONES**

A continuación se describen las principales características hidrogeológicas de las distintas unidades cartográficas que aparecen en la Hoja, agrupadas en función de sus características litológicas, geométricas y de permeabilidad.

- Fc. Cascante. Arcillas con areniscas y conglomerados.

Las distintas unidades que forman la Fc. Cascante están formadas principalmente por areniscas, arcillas y niveles de conglomerados. Las areniscas, presentan tonos pardos y rojos de naturaleza cuarcítica, calcárea y de fragmentos de rocas, con cemento calcáreo, fundamentalmente de grano medio, con numerosos clastos dispersos o formando niveles.

Las arcillas son de carácter limoso y los conglomerados son de naturaleza muy variada: silícica, pizarras paleozoicas, calizas y areniscas mesozoicas, con matriz arenosa poco compacta y estratificación poco marcada de tonos rojos con gran cantidad de limos.

El espesor de este conjunto se ha establecido en el centenar de metros, aunque es muy difícil de establecer debido a sus relaciones estratigráficas con los otros niveles de los que se considera cambio lateral de facies.

La permeabilidad de este conjunto es media a baja. Mayor en los niveles calcáreos poco cementados y muy baja o nula en los niveles más arcillosos.

- Fc.. Alfaro y Tudela. Mioceno inferior a medio

Las Fc. Alfaro y Tudela, en sus distintos niveles están formada por una potente series de arcillas rojizas, en las que se intercalan niveles de areniscas, en el caso de la facies Alfaro y calizas margosas, en el caso de la facies Tudela. Se disponen de forma discordante sobre la Fm. Lerín mediante un contacto truncacional y erosivo.

La permeabilidad es muy baja dado el marcado predominio de los términos arcillosos y la escasa potencia de las intercalaciones. Únicamente se pueden desarrollar acuíferos locales a favor de los niveles de calizas y areniscas más potentes.

- Conglomerados de Yerga

Como en el caso de los conglomerados de Fitero, los conglomerados de Yerga están formados en bancos de cantos de tamaño muy variable, principalmente de caliza y de cuarcita, con arenosa poco compacta. Esta menor cementación hace que puedan comportarse como una formación algo más permeable que los conglomerados de Fitero, pero sin llegar a constituir un acuífero de permeabilidad alta.

- Formaciones cuaternarias de alta permeabilidad

Se agrupan en esta apartado las formaciones permeables del Cuaternario que litológicamente corresponden a depósitos de gravas y arenas que pueden contener términos lutíticos en proporciones menores.

Su origen está ligado principalmente a la dinámica fluvial de los principales ríos Ebro, Aragón y Arga. Las terrazas medias y bajas se desarrollan de forma escalonada ocupando extensas superficies junto con otros materiales clásticos de génesis fluvial, y las terrazas altas algo más aisladas, desconectadas parcialmente del cauce actual.

La potencia de estos depósitos es por lo general de orden métrico (1-20 m) aunque pueden registrarse localmente valores mayores sobre substratos yesíferos colapsados.

La permeabilidad es alta, al menos para los niveles bajos y medios, por porosidad intergranular dada su granulometría grosera, escasez de matriz lutítica y poca o nula cementación.

- o Formaciones cuaternarias de media y baja permeabilidad

Se agrupan en el presente epígrafe las formaciones del Cuaternario que están constituidas litológicamente por lutitas con un contenido variable en elementos clásticos.

Corresponden principalmente a depósitos de ladera, endorreicos y conos aluviales.

Su composición litológica depende del área de procedencia consistiendo generalmente en fangos con cantos de calizas y de areniscas en proporciones variables.

La permeabilidad es, en términos generales, bastante baja para este conjunto de depósitos, si bien puede aumentar localmente por lavado de los finos, permitiendo el paso de agua por porosidad intergranular.

### **6.2.3. Unidades acuíferas**

Se describen a continuación las Unidades Hidrogeológicas que albergan formaciones geológicas susceptibles de almacenar y transmitir el agua, y por lo tanto capaces de constituir acuíferos.

En el Proyecto Hidrogeológico desarrollado entre 1975 y 1977 por la Diputación Foral de Navarra (D.F.N.), los materiales de la zona se agrupan en 3 Unidades Hidrogeológicas con funcionamiento independiente, si bien pueden presentar localmente algunas conexiones.

Por orden cronoestratigráfico son:

- Unidad Hidrogeológica Sur
  
- Unidad Hidrogeológica del Aluvial del Ebro y Afluentes

#### **6.2.3.1. Unidad hidrogeológica sur**

- o Geometría

La Hoja se emplaza en el sector central de la Cuenca por lo que predominan las facies lutíticas de origen aluvial y las formaciones evaporíticas lacustres, constituyendo un conjunto bastante impermeable. Dentro de esta Cuenca, la Unidad Hidrogeológica Sur está representada por los materiales terciarios de relleno de la Cuenca del Ebro en condiciones endorreicas.

La estructura de la serie terciaria en la zona se realiza a partir de una serie de pliegues de gran radio ampliamente extendidos en dirección ESE-ONO, con buzamientos crecientes hacia los ejes anticlinales.

Las formaciones lutíticas intercalan niveles de areniscas y calizas de escasa potencia (decimétrica). En ocasiones estos niveles alcanzan espesores de orden métrico constituyendo acuíferos locales de escasa entidad.

Por lo que se refiere a las unidades evaporíticas, estas pueden presentar potencias de hasta cerca de 1000 m (Fm. Falces), según se deduce de datos de sondeos, aunque normalmente forman en superficie intervalos yesíferos muy expansivos de unos 50 a 200 m de potencia, (Yesos de Sesma y de Los Arcos básicamente), intercalados en facies lutíticas (Fm. Lerín). En el subsuelo aparecen como una alternancia entre anhidritas y halita con intercalaciones de lutitas y carbonatos, comportándose como formaciones salinas de muy baja permeabilidad.

La circulación de agua se circunscribe a las zonas superficiales donde la karstificación de los yesos alcanza, en la Hojas 243 y 244, profundidades máximas del orden de algunos metros, ya que normalmente se encuentran intercalados niveles arcillosos que impiden la circulación del agua, como es el caso de la Unidad Yesos de Los Arcos.

- Funcionamiento hidrogeológico

Los niveles más potentes de areniscas (Areniscas de Villafranca, etc.) pueden formar pequeños acuíferos confinados que permiten cierta circulación de agua en zonas con desarrollo de fracturación y/o diaclasado, y especialmente en situación próxima a la superficie, donde presentan procesos de descalcificación. A mayor profundidad disminuye la porosidad por una mayor cementación, aumentando la mineralización de las aguas.

Los horizontes de calizas de mayor potencia (2-3 m de espesor máximo, en las Calizas de la Fm. Tudela) pueden albergar agua y permitir su circulación través de fracturas.

En los principales niveles evaporíticos, la permeabilidad se origina en los niveles superficiales por karstificación de los yesos, lo que puede dar lugar, en ocasiones, a manantiales salinos, pero muy superficiales y de escasa entidad

En todos los casos la recarga se produce esencialmente por infiltración del agua de lluvia. La descarga se realiza por manantiales dispersos y por transferencia hacia los ríos a través de depósitos cuaternarios permeables. Los caudales registrados en los manantiales y pozos son bajos, con valores inferiores a 1 l/s.

- Parámetros hidráulicos

No existen datos concretos de permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc., basados en ensayos de bombeo o test hidráulicos realizados en la zona.

El elevado grado de consolidación de muchos de los niveles areniscos limita la porosidad eficaz y por tanto su permeabilidad. Esto, unido a su carácter anisotrópico o individualizado, reduce las posibilidades de explotación.

En las unidades evaporíticas cabe señalar la irregular distribución de la karstificación y la pésima calidad de las aguas por su gran dureza y mineralización (aguas sulfatadas y sulfatado-cloruradas cálcicas y sódico-cálcicas magnésicas) por lo que constituyen recursos poco apreciados.

#### **6.2.3.2. Unidad Hidrogeológica Aluvial del Ebro y Afluentes**

- Geometría

De acuerdo con la descripción propuesta en D.F.N., (1975-77), la Unidad Hidrogeológica del Aluvial del Ebro y Afluentes comprende las llanuras aluviales o fondos de valle y las terrazas encajadas del río Ebro y sus principales afluentes. En la parte correspondiente a la Ribera de Navarra se extiende desde Viana hasta Cortes de Navarra y ocupa una superficie de unos 900 km<sup>2</sup>, de los que 735 km<sup>2</sup> pertenecen a Navarra.

En la presente Hoja, (Tudela, 282-IV), comprende los acuíferos cuaternarios ligados al curso del Ebro. En esta Unidad, los niveles acuíferos aparecen relacionados con depósitos de arenas y gravas de cantos heterométricos, y registran una escasa o nula cementación, normalmente intercalados en materiales limosos y arcillosos, correspondientes esencialmente a llanuras de inundación y terrazas bajas de los ríos Arga, Aragón y Ebro.

Otros depósitos cuaternarios permeables, entre los que destacan las terrazas altas, se encuentran en buena parte desconectados de los valles principales, constituyendo acuíferos locales aislados.

- Funcionamiento hidrogeológico.

El sistema del aluvial del Ebro y afluentes se comporta como un acuífero único de carácter libre en el que los diversos niveles de terrazas están conectados hidráulicamente.

La recarga se realiza esencialmente por infiltración del agua de lluvia (estimada para la Unidad en unos 45 hm<sup>3</sup>/año) y de los excedentes de los riegos (unos 90 hm<sup>3</sup>/año) y, en menor medida, por escorrentía de las aguas procedentes de los relieves circundantes o transmitidas por otros acuíferos e inundaciones estacionales por desbordamientos de los ríos.

La explotación del agua subterránea supone alrededor del 30% de la recarga por lo que los ríos son efluentes y constituyen las principales vías de descarga de la Unidad. No obstante pueden registrar esporádicamente un comportamiento como influentes por inundaciones en épocas de crecidas.

La piezometría del sistema está predominantemente influida por los ríos, presentando oscilaciones de nivel del orden de unos 4 m. En general se establece una buena conexión río-acuífero, con niveles altos en primavera-invierno y bajos en verano. Localmente se distinguen zonas de conexión hidráulica deficiente, con oscilaciones de nivel de unos 2 m. La piezometría está directamente condicionada en estos casos por los retornos de los riegos, observándose un comportamiento inverso al general, con niveles altos en verano y bajos en primavera-invierno. El gradiente hidráulico oscila entre 2 y 0,05 %.

En los acuíferos colgados la recarga se establece por infiltración del agua aportada por la lluvia y por los riegos. La descarga se realiza a favor de pequeños manantiales y por transferencia a otras formaciones más o menos permeables.

o Parámetros hidráulicos

Se han recopilado los datos existentes en el libro de “Las aguas subterráneas en Navarra” (D.F.N., 1975-77). En el marco de este proyecto se realizaron ensayos que proporcionaron para el aluvial del Aragón unos valores de transmisividad comprendidos entre 3.000 y 100 m<sup>2</sup>/día, siendo muy frecuentes los registros de 300-500 m<sup>2</sup>/día, mientras que para el Arga se cifra en unos 100-500 m<sup>2</sup>/día. La porosidad eficaz es de un 10-30 %.

Las aguas del acuífero del Aragón muestran una composición muy poco variable, son netamente bicarbonatadas cálcicas registrando una dureza media y mineralización alta. En el Arga se trata de aguas bastante duras y mineralizadas, de carácter clorurado sódico.

**6.2.3.3. Manantiales**

Los principales manantiales que aparecen en esta Hoja son los siguientes:

Codigo	Nombre	Tipo	Cuenca	Subcuen	Municipio
532	Barranco arriero	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada
599	Casilla	Manantial	Ebro	Alhama	Corella
529	Casilla	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada
531	Castellal	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada
15546	Castellar i	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15547	Castellar ii	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15539	De la ermita	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15545	Del olivo	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15541	Del olmo	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
557	El arriero	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada
553	Fuente arriero	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada
10175	Fuente zauril	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela
12774	Las costadas i	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela
12779	Las costadas ii	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela
12780	Las costadas iii	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela

12781	Las costadas iv	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela
2095	Los cuchillicos i	Manantial	Ebro	Ebro	Cabanillas
2096	Los cuchillicos ii	Manantial	Ebro	Ebro	Cabanillas
12782	Los ferroviarios	Manantial	Ebro	Ebro	Tudela
15544	Los pinos	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15548	Royales i	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
15549	Royales ii	Manantial	Ebro	Ebro	Fontellas
10112	Tura	Manantial	Ebro	Queiles	Cascante
550	Via	Manantial	Ebro	Ebro	Ribaforada

### 6.3. GEOTECNIA

#### 6.3.1. Introducción

En este apartado se describe la cartografía geotécnica de la Hoja a escala 1:25.000 nº 282-IV correspondiente a Tudela, y se establecen las características geomecánicas de los materiales que la componen.

Esta caracterización geotécnica se ha realizado en función de la disponibilidad de datos geotécnicos que se han podido recopilar en obras y proyectos. En el caso de no disponer de esta información, se efectúa una valoración geotécnica según las características litológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de los materiales.

El objetivo de este trabajo es proporcionar al usuario una información geotécnica de carácter general, pero lo suficientemente objetiva como para permitir la toma de posturas iniciales en temas de ordenación del territorio, o prever problemas en el planteamiento y diseño de campañas geotécnicas puntuales.

#### 6.3.2. Metodología

Para la realización de este capítulo se han seguido las siguientes etapas:

1. Recopilación de los datos existentes: Dado que en la Hoja no se han podido recoger datos procedentes de obras y proyectos, realizados en

Navarra por organismos públicos y empresas privadas, se ha acudido a las hojas contiguas donde existen datos geotécnicos sobre las mismas unidades

2. Tratamiento de los datos: En esta etapa se trata de establecer, de la manera más adecuada posible la naturaleza actual de la roca, su comportamiento mecánico y/o hidráulico y, la evolución y propiedades de la roca bajo los procesos de meteorización. Los datos recopilados se clasifican en los siguientes grupos:

1. Identificación; establecen la naturaleza de la roca y su estado natural aparente (granulometría, límites de Atterberg, densidad y humedad, absorción, grado de meteorización).
2. Clasificación; intentan establecer una idea general del comportamiento de la roca en relación a criterios previamente establecidos. Algunos de estos criterios se fijan en base a resultados de ensayos de resistencia. (Índice de Calidad, resistencia a compresión simple, point load test).
3. Resistencia, compactación y deformación; determinan parámetros resistivos y relaciones tensión-deformación. Algunos de estos ensayos se utilizan como base para múltiples clasificaciones (CBR, proctor normal, corte directo, Brasileño).
4. Alterabilidad; evalúa el comportamiento del macizo rocoso frente a los procesos de meteorización, una vez modificados sus condiciones originales de estabilidad. (análisis químicos, hinchamiento, durabilidad).

3. Zonificación en áreas de iguales características: A partir de los datos anteriormente comentados e interpretando las unidades geológicas cartografiadas, se procede a la zonificación de la superficie de la Hoja en áreas de iguales características (geotécnicas y litológicas). Como se ha señalado con anterioridad, cuando no ha sido posible disponer de ensayos, los criterios seguidos para establecer esta zonificación, han sido las

características litológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de los materiales, observadas durante los reconocimientos de campo.

### **6.3.3. Zonificación geotécnica**

#### **6.3.3.1. Criterios de división**

La superficie de las Hojas 1:50.000 de Cervera del río Alhama (281) y Tudela (282), en el ámbito de este trabajo, se ha dividido, en función de la edad de los materiales, en tres Áreas que presentan una entidad propia y cierta homogeneidad. Posteriormente, estas Áreas han sido divididas a su vez en un total de diez Zonas, siguiendo criterios básicamente litológicos y morfológicos, ya que son éstos los que permiten diferenciar desde un punto de vista geotécnico los materiales de cada Área.

#### **6.3.3.2. División en Áreas y Zonas Geotécnicas**

Las Áreas geotécnicas consideradas en el conjunto de los 6 cuadrantes de las Hojas 281 (Cuadrantes 281-II y IV) y 282 (Cuadrantes I, II, III y IV) son las siguientes:

ÁREA I: Engloba los materiales del Mesozoico.

ÁREA II: Incluye los materiales plegados del Oligoceno de carácter yesífero

ÁREA II: Comprende los materiales poco plegados o subhorizontales del Mioceno

ÁREA III: Agrupa todos los depósitos cuaternarios

Estas Áreas se han dividido en las siguientes Zonas:

ÁREA I: ZONAS I<sub>1</sub> y I<sub>2</sub>

ÁREA II: ZONAS II<sub>1</sub>

ÁREA III: ZONA III<sub>1</sub>, III<sub>2</sub>, III<sub>3</sub>

ÁREA IV: ZONA IV<sub>1</sub>, IV<sub>2</sub>, IV<sub>3</sub>, IV<sub>4</sub>

En el Cuadro 1 se presenta la correlación entre las Unidades Geológicas cartografiadas y las Zonas Geotécnicas.

UNIDAD CARTOGRÁFICA	ZONACIÓN GEOTÉCNICA	DESCRIPCIÓN
542	IV <sub>4</sub>	Áreas endorreicas
537, 543	IV <sub>3</sub>	Coluviones y aluvial-coluvial
515, 518, 519, 520, 534, 536	IV <sub>2</sub>	Glacis y conos de deyección
505 a 508, 521, 524, 511, 527, 526, 529, 530	IV <sub>1</sub>	Terrazas, llanura aluvial
376 a 379, 389, 396	III <sub>3</sub>	Arcillas
371, 373, 374, 375, 405	III <sub>2</sub>	Arcillas con areniscas y conglomerados
372	III <sub>1</sub>	Conglomerados
354,355	II <sub>1</sub>	Yesos
109 a 116, 120 a 123	I <sub>2</sub>	Rocas carbonatadas
109, 117, 119, 124	I <sub>1</sub>	Arcillas y areniscas

Cuadro 1.- Correlación entre las unidades geológicas y zonas geotécnicas

### 6.3.3.3. Características geotécnicas

#### 6.3.3.3.1. Introducción

De los materiales que se disponen ensayos, aunque no sea en esta Hoja, se ha realizado una caracterización geomecánica utilizando los criterios que se señalan más adelante. No obstante, la generalización a cada zona de estos valores puntuales es complicada,

sobre todo cuando en ella coexisten varios conjuntos litológicos con un comportamiento geomecánico diferente, y que no admiten ser diferenciados por razones de escala de trabajo. Cuanto mayor sea la heterogeneidad litológica de cada Zona, mayor será la dispersión de los valores; por tanto, la mayor o menor fiabilidad de los datos aportados vendrá condicionada por el grado de homogeneidad litológica de las Zonas Geotécnicas.

De cada Zona Geotécnica se aportan datos sobre características constructivas, tales como condiciones de cimentación, excavabilidad, estabilidad de taludes, empuje sobre contenciones, aptitud para préstamos, aptitud para explanada de carreteras y comportamiento para obras subterráneas. Así mismo, se señalan los principales problemas geotécnicos que pueden presentarse y que en general, van a estar relacionados con la presencia de: turbas o arcillas compresivas, nivel freático superficial, zonas de alteración superficial del sustrato rocoso, erosiones y arrastres de materiales en laderas, desprendimientos de rocas y, finalmente, suelos solubles y agresivos (yesíferos y salinos).

La caracterización geomecánica de los diferentes materiales, se ha realizado con ayuda de los ensayos de laboratorio y de campo. Hay que señalar que el número de ensayos geotécnicos es muy reducido, teniendo en cuenta la extensión de la zona y la diversidad de formaciones existentes, por lo que estos valores deben considerarse como orientativos y en ningún caso pueden sustituir a los ensayos geotécnicos de detalle. Se ha recopilado información de los siguientes ensayos:

- Granulometría. Del análisis granulométrico se ha considerado el contenido de finos que presenta el suelo, es decir, el porcentaje que pasa por el tamiz Nº 200 (0.08 mm) de la serie ASTM. Estos datos son utilizados posteriormente en diversas clasificaciones.
- Plasticidad. La clasificación de los suelos cohesivos según su plasticidad se ha efectuado con el límite líquido (WL) y el índice de plasticidad (IP), utilizando la carta de plasticidad de Casagrande.

- Absorción de agua. Permite obtener una idea del grado de meteorización o fisuración por comparación de muestras del mismo material. Está relacionado con la expansividad del terreno.
- Índice de calidad ( $I_Q$ ). Se define como la relación porcentual entre la velocidad de propagación de ondas longitudinales ( $V_L$ ) en testigos cilíndricos de roca y en roca sana (sin fisuras ni huecos). La Figura 6.1 muestra valores medios de  $V_L$  en diferentes tipos de roca en estado sano.

Tipo de rocas	$V_L$ media (m/s)
Gabros	7000
Basaltos	6500 a 7000
Cuarcitas	6000
Granitos	5500 a 6000
Calizas	6000 a 6500
Calizas dolomíticas*	6500 a 7500
Argilitas**	900 a 2600

Fig. 6.1. Velocidades máximas medias de propagación de ondas longitudinales en los principales tipos de rocas. (\* según el contenido en dolomía; \*\* según la estructura y grado de alteración).

En general, la velocidad de propagación está en relación inversa con la porosidad de la roca ( $n$ ). Con el índice de calidad ( $I_Q$ ) y el valor de porosidad ( $n$ ) de la roca, puede determinarse la Densidad de Fisuración, tal y como muestra la Figura 6.2

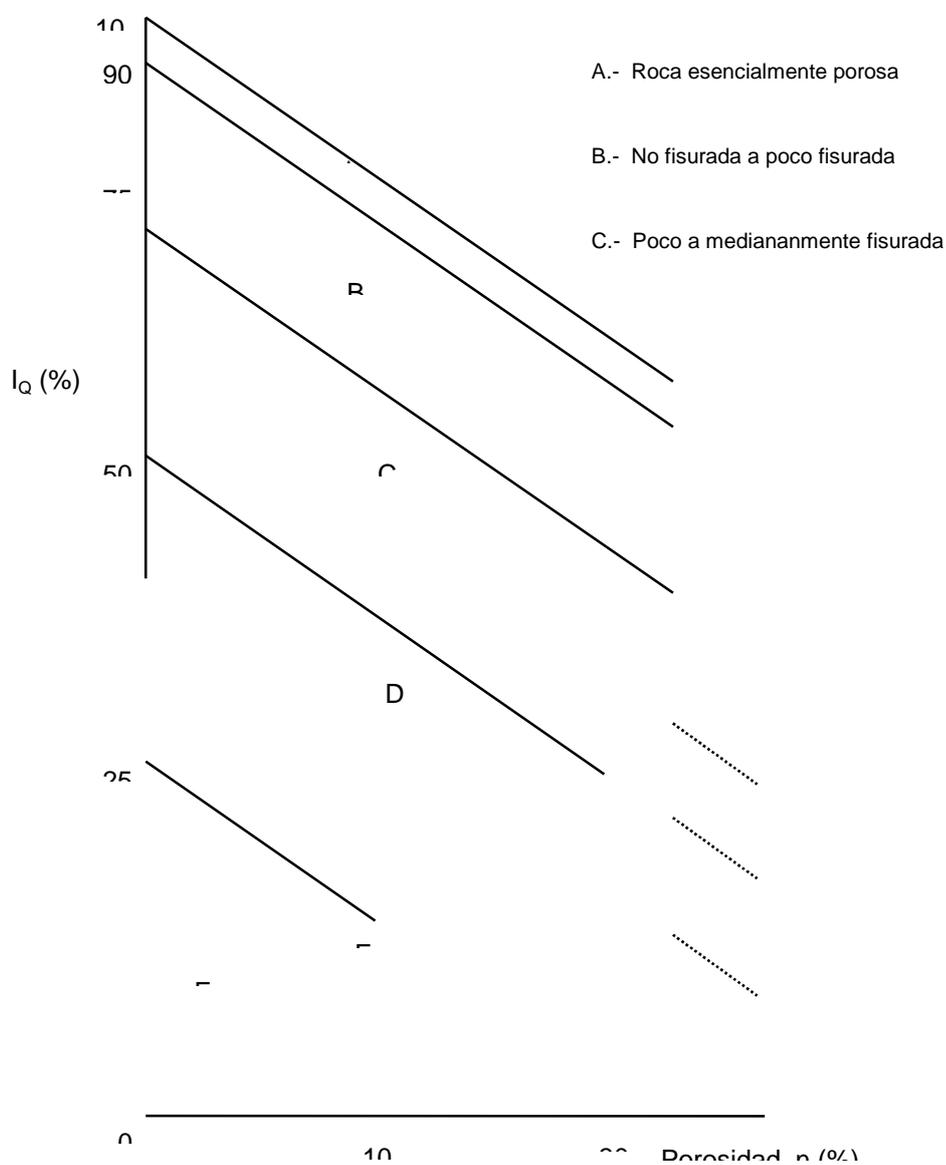


Fig. 6.2. Descripción de la densidad de fisuración de una muestra de roca con ayuda del índice de calidad y la porosidad total. (modificado de FOURMAINTREAU, 1976; en OTEO MAZO, 1978).

- Grado de meteorización. Mediante reconocimientos y descripciones “de visu” se determina el grado de meteorización de las muestras según la siguiente relación:

Grado de meteorización	Denominación
I	Sana
II	Meteorización incipiente (juntas oxidadas)
III	Moderadamente meteorizada
IV	Muy meteorizada
V	Completamente meteorizada

- Resistencia a compresión simple ( $Q_u$ , Kp/cm<sup>2</sup>). Determina las características de resistencia y deformación de una muestra seca. Respecto a la resistencia de suelos y rocas, existen numerosas clasificaciones; una de la más utilizada, es la descrita por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas:

ROCA		ENSAYO DE CAMPO	
Descripción	Co (MPa)	Navaja	Martillo geológico
Ext. Resistente	> 250	No corta	El golpe arranca pequeños trozos
Muy resistente	100 - 250	No corta	Se rompe con muchos golpes
Resistente	50 - 100	No corta	Se rompe con varios golpes
Medio resistente	25 - 50	No corta	Se rompe con un solo golpe
Blanda	5 - 25	Corta con dificultad	Puede indentarse con el pico

Muy blanda	1 - 5	Corta fácilmente	Se puede machacar
------------	-------	------------------	-------------------

Igualmente, considerando la resistencia a compresión simple, se puede valorar la consistencia del terreno, de manera cualitativa.

Tensión de rotura a compresión simple en Kp/cm <sup>2</sup>	Consistencia
< 0,25	Muy blando
0,25 a 0,50	Blando
0,50 a 1	Medio
1 a 2	Firme
2 a 4	Muy firme
> 4	Duro

- Ensayo de Carga Puntual ( $I_s$ , Kp/cm<sup>2</sup>). Determina la resistencia de una muestra de testigo. Por su facilidad de realización se utiliza en aquellos casos en los que las muestras no reúnen las condiciones necesarias para realizar un ensayo de compresión simple (baja dureza, elevada anisotropía,). Requiere un elevado número de ensayos y un tratamiento estadístico de los mismos para obtener resultados fiables. Generalmente  $I_s$  presenta una buena correlación con el ensayo de resistencia a compresión simple ( $Q_u$ ), mediante la siguiente relación:  $Q_u = f \cdot I_s$ , donde  $f$  es una constante que depende del diámetro del testigo de roca.

- **Ensayo Proctor Normal.** Permite calcular la densidad máxima y humedad óptima de compactación del suelo o material utilizado en explanada, con el fin de que adquiera las condiciones de estabilidad volumétrica, resistencia, indeformabilidad e inalterabilidad necesarias. En suelos granulares basta conseguir una alta densidad seca, pero en suelos con finos es preciso controlar también las condiciones humedad. La presencia de agua disminuye la presión intergranular, y actúa como lubricante, facilitando el deslizamiento y giro de las partículas entre sí y su agrupamiento en estructuras más compactas. El resultado es una densidad seca más elevada.
  
- **Ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio).** Evalúa la capacidad de soporte de los materiales para constituir una explanada, es decir, la resistencia que ofrecen a la deformación bajo cargas. Se utiliza por tanto para el dimensionamiento de firmes. A mayor CBR, mayor es la capacidad de soporte de la explanada. Normalmente se expresa el valor de CBR para el 95 % y 100% de la densidad Proctor.
  
- **Ensayo de tracción indirecta ( $\sigma_{tb}$ , Kp/cm<sup>2</sup>).** También conocido como “Brasileño”, es un ensayo normalizado de tracción más adecuado para clasificar la resistencia de la roca que la resistencia a tracción. La relación entre la resistencia a compresión simple ( $Q_u$ ) y la resistencia a tracción ( $\sigma_{tb}$ ) en el ensayo brasileño ( $Q_u/\sigma_{tb}$ ) aumenta al hacerlo  $Q_u$ , pudiendo variar de 10 a 15 para  $Q_u < 500$  Kp/cm<sup>2</sup>, y de 15 a 25 para resistencias más elevadas. El criterio de clasificación de rocas con rotura frágil a partir de ensayos brasileños es como sigue:

Resistencia	$\sigma_{tb}$ , Kp/cm <sup>2</sup>
Muy débil	0-15
Débil	15-35
Media	35-65

Alta	65-100
Muy alta	> 100

- Ensayo de corte directo. Es un ensayo rápido y económico que permite determinar la cohesión (c) y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) de una muestra de roca o discontinuidad. Es de gran aplicación práctica en el cálculo de estabilidad de taludes.
- Ensayo de Molinete. Permite hallar la resistencia al corte en suelos blandos, principalmente arcillas blandas saturadas o suelos orgánicos.
- Módulo de deformación y coeficiente de Poisson. El módulo de deformación se puede obtener en arcillas sobreconsolidadas, utilizando el valor de la resistencia al corte sin drenaje ( $C_u$ ) en la correlación  $E = 130 \times C_u$  definida por Butler. Para el coeficiente de Poisson se podría adoptar un valor entre 0,30 y 0,35, dependiendo de la consistencia blanda o densa.
- Análisis químico. Se han utilizado los datos de contenido en Materia Orgánica, Carbonatos y Sulfatos. Estos últimos permiten determinar la agresividad del terreno mediante el contenido en sulfatos, valorado según la normativa que se expone a continuación:

En las aguas	En el terreno	Agresividad
< 0,03	< 0,2	Débil
0,03 a 0,1	0,2 a 0,5	Fuerte
> 0,1	> 0,5	Muy fuerte

- Ensayo de durabilidad ( $I_D$ ). Mide la resistencia de la roca frente a procesos de meteorización y disgregación como resultado de someter a la muestra a dos ciclos de secado y agitación en un baño de agua. Se obtiene un índice ( $I_D$ ) que muestra la relación porcentual entre el peso seco de la muestra después de dos ciclos y el peso seco antes del ensayo. La durabilidad del material puede relacionarse con el índice de plasticidad ( $I_P$ ) en rocas arcillosas según el cuadro que muestra la Figura 6.3.

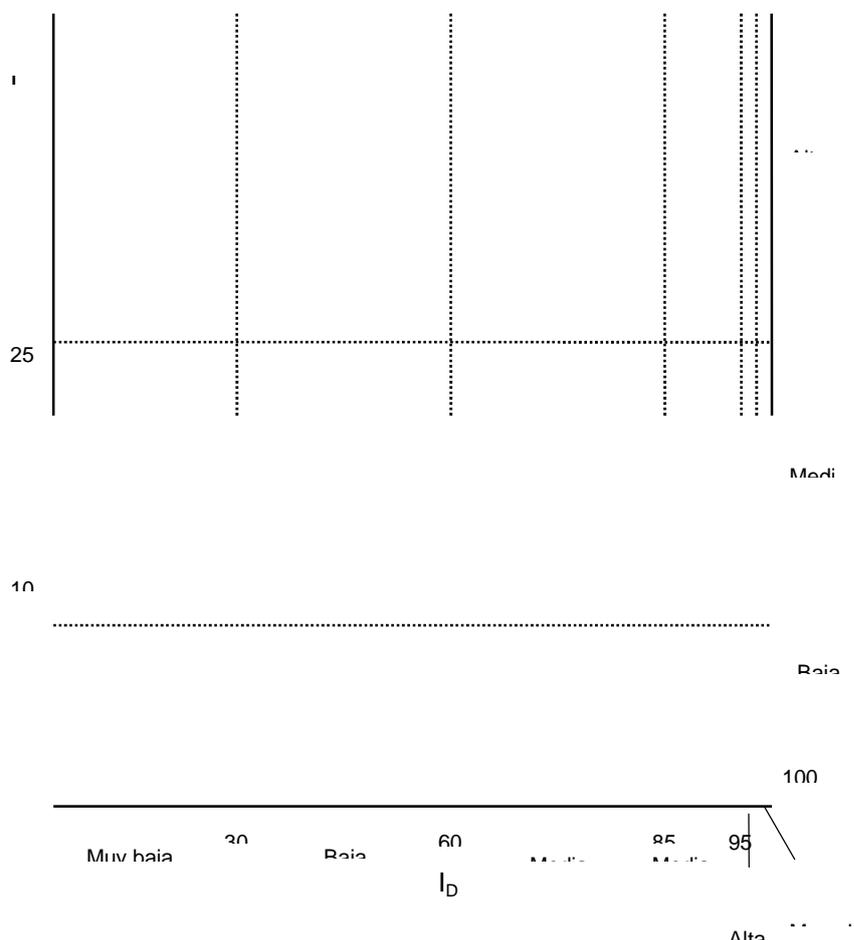


Fig. 6.3. Clasificación de durabilidad-plasticidad en rocas arcillosas propuesta por GAMBLE (ISRM, 1972).

- Análisis de Hinchamiento. Mide el cambio de volumen debido al humedecimiento general de la roca. Normalmente se suele medir la componente vertical de

hinchamiento. Los datos que se poseen sobre la expansividad del terreno están obtenidos a través del ensayo Lambe, que fija el cambio potencial de volumen (C.P.V.) de la manera siguiente:

C.P.V.	Descripción
0 - 2	No crítico
2 - 4	Marginal
4 - 6	Crítico
> 6	Muy crítico

Las características constructivas de los diferentes materiales se estudian para condiciones de cimentación y para obras de tierra.

- Cimentación. Se evalúa la capacidad portante del terreno. Normalmente se ha utilizado el criterio expuesto en el Código Británico nº 4 y Norma DIN-1054, que establece cargas admisibles para roca poco diaclasada, no meteorizada con estratificación favorable y marcada de 15 Kp/cm<sup>2</sup> y de 30 Kp/cm<sup>2</sup> en estado masivo o columnar. (En caso de rocas diaclasadas o con disposición desfavorable de los planos de estratificación, estos valores deberán reducirse a la mitad.

Descripción de la roca	Kp/cm <sup>2</sup>
Roca ígnea o gnéisica sana	109
Calizas masivas y areniscas duras	44
Esquistos y pizarras	33

---

Lutitas duras, limolitas y areniscas blandas	22
Lutitas arcillosas	11

Cargas admisibles según el Código de Práctica Británico nº 4, para diferentes tipos de roca.

En suelos y debido a que no se dispone de datos sobre asentamientos, éstos han sido estimados considerando la consistencia media del terreno. Asimismo, se señalan los problemas concretos de cimentación que pueden darse en cada Zona Geotécnica; los más generalizados están relacionados con asentamientos diferenciales, presencia de agua subterránea, presencia de sulfatos en el sustrato, debido a la alta reactividad de los mismos con el hormigón, y riesgos de colapsos en aquellas unidades con presencia potencial de cavidades subterráneas.

- **Excavabilidad.** Los terrenos se han clasificado de acuerdo con la Norma Tecnológica de Edificación (Acondicionamiento del Terreno. Desmontes. Vaciados; NTE-ADV, (1976) en los siguientes grupos: 1) Duro. Atacable con máquina o escarificador, pero no con pico, como terrenos de tránsito, rocas descompuestas, tierras muy compactas; 2) Medio. Atacable con el pico, pero no con la pala, como arcillas semicompactas, con o sin gravas o gravillas; 3) Blando. Atacable con la pala, como tierras sueltas, tierra vegetal, arenas. Cuando en la excavación se encuentran mezclados los terrenos se establece el porcentaje de cada uno de los tres tipos.
- **Estabilidad.** Dos son los parámetros que condicionan estos procesos: litología (y estructura) y pendiente del talud. En consecuencia, en cuanto a la naturaleza de los materiales se evalúa su estabilidad en tres grupos (alta, media y baja), desechándose aquellas unidades geológicas que por su litología no son favorables a la aparición de situaciones de inestabilidad. Por lo que se refiere a la pendiente, se estima una inclinación del 10% como límite inferior a la aparición de estos fenómenos.

- Empujes sobre contenciones. Hacen referencia a contenciones del terreno natural, no de rellenos realizados con los materiales de cada zona.
- Aptitud para préstamos. Se ha utilizado básicamente el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de la Dirección General de Carreteras (P.P.T.G.). El término No Apto designa suelos inadecuados; Marginal, designa suelos que unas veces son inadecuados y otras tolerables e incluso adecuados; el término Apto, designa suelos tolerables, adecuados e incluso seleccionados.
- Aptitud para explanada en carreteras. Se evalúa la capacidad de soporte de los materiales para constituir una explanada, es decir, la resistencia que ofrecen a la deformación bajo cargas.

Se ha tomado como referencia la Instrucción de Carreteras, Normas de Firmes Flexibles y Firmes Rígidos. Se entiende por suelo No Apto, aquel que no puede constituir un desmonte ni un terraplén explanada tipo E-1 (Suelos tolerables al menos estabilizado en sus 15 cm superiores, con CBR de 5 a 10). Marginales son aquellos que cumplen a veces dicha condición; en especial suele referirse a terrenos tolerables, que no conviene que sean explanada directamente (CBR de 10 a 20). Aptos, son terrenos frecuentemente adecuados y seleccionados; constituyen explanadas tipo E-3 (CBR > 20).

En terraplenes y pedraplenes, la categoría de la explanada dependerá del material utilizado en su coronación.

- Obras subterráneas. Se utiliza el término "Muy Difícil" para suelos muy blandos por debajo del nivel freático o suelos potencialmente expansivos; "Difícil" designa terrenos blandos o arenosos limpios bajo el nivel freático; y "Medio", suelos firmes, casi rocas blandas, que sólo a veces presentan problemas de nivel freático, con cierta capacidad de autoaporte y sin empujes fuertes.

Para las formaciones rocosas se da una idea de su categoría en las clasificaciones de Bieniawski (1979), que obtiene un índice de calidad (RMR, Rock Mass Rating), mediante la valoración de cinco parámetros:

- Resistencia de la roca
- RQD
- Separación entre diaclasas
- Presencia de agua
- Disposición de las juntas respecto a la excavación

Bieniawski establece cinco categorías en función del valor RMR:

Clase I	Roca muy buena: RMR = 81-100
Clase II	Roca buena: RMR = 61-80
Clase III	Roca media: RMR = 41-60
Clase IV	Roca mala: RMR = 21-40
Clase V	Roca muy mala: RMR 20

#### **6.3.3.3.2.** Área I

##### *6.3.3.3.2..1 ZONA I<sub>1</sub>*

- Características Geológicas

En esta primera zona se incluyen las arcillas y yesos versicolores pertenecientes a la facies Keuper y las unidades arcillosas jurásicas y cretácicas. Aparecen únicamente en el

cuadrante de Cervera del río Alhama (281-IV)), dentro de la cadena Ibérica. Son materiales de carácter yesífero, y por lo tanto muy plástico, por lo que aparecen muy tectonizados y flanqueados por fracturas.

En general, la permeabilidad es baja o muy baja, aunque localmente la permeabilidad puede estar incentivada por una fracturación intensa.

- Características geotécnicas

Las características fundamentales de los materiales que constituyen esta Zona son las siguientes: a) la alternancia de arcillas y yesos y la importante tectonización y diapirismo de estos materiales confiere en muchos casos una acusada heterogeneidad al conjunto, lo que se traduce en un comportamiento mecánico no uniforme; b) la constante presencia de yesos presupone un alto contenido en sulfatos tanto en los suelos como, eventualmente, en las aguas que los drenan y por tanto es de esperar una fuerte agresividad a hormigones; y c) Los fenómenos de disolución y karstificación en yesos, aunque son relativamente superficiales, pueden originar importantes discontinuidades en el subsuelo y dar lugar a fenómenos de colapso del terreno.

- Características constructivas

- a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

La Norma DIN 1054 y el Código Británico establecen presiones admisibles del orden 1.5-3 kp/cm<sup>2</sup>. Se estima que la capacidad portante de estos materiales se sitúa entonces entre 5 y 10 kp/cm<sup>2</sup>, valores suficientes para el caso de edificios habituales en los que las cargas proyectadas son inferiores a 3-4 kp/cm<sup>2</sup>. El tipo de cimentación será en general superficial, previa eliminación del horizonte de alteración. Es de esperar la presencia de asientos diferenciales debido a la intercalación de niveles margosos blandos entre los paquetes de yesos.

- b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Son materiales de dureza baja por lo que son ripables y fácilmente excavables por medios mecánicos.

*Estabilidad de taludes.* Son taludes estables en condiciones naturales, no se registran fenómenos destacables de inestabilidad en taludes muy inclinados de escasa altura o en cortes naturales de baja a media pendiente. Sin embargo, son materiales de deterioro progresivo el riesgo de caída de pequeños bloques y deslizamientos es muy elevado en taludes subverticales de cierta altura, especialmente en las zonas de voladizo por descalce de los niveles lutíticos inferiores, tal como se observa en los farallones labrados por los ríos.

*Empuje sobre contenciones.* No serán necesarias para el caso de las margas, y a considerar para los yesos.

*Aptitud para préstamos.* No son materiales aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Constituyen suelos no aptos para explanadas.

*Obras subterráneas.* Se incluyen entre la Clase IV (Calidad Mala) y Clase V (Calidad Muy Mala) de la Clasificación de BIENIAWSKI (1979).

#### 6.3.3.3.2.2 ZONA I<sub>2</sub>

- Características Geológicas

En esta primera zona se incluyen todas las unidades jurásicas y cretácicas de carácter carbonatado, calizas y dolomías esencialmente. Aparecen únicamente en el cuadrante de Cervera del río Alhama (281-IV)), dentro de la cadena Ibérica. Son materiales carbonatados, muy rígidos, que, como el resto de unidades mesozoicas aparecen muy tectonizados y flanqueados por fracturas.

En general, la permeabilidad es alta o muy alta, por karstificación y fracturación.

- Características Geotécnicas
- Características Constructivas

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

El tipo de cimentación será superficial, previa eliminación del horizonte de alteración. Presentan una buena capacidad portante, superior a los valores requeridos para la cimentación de edificios habituales, pudiéndose aplicar cargas superiores a  $30 \text{ Kp/cm}^2$  (Código Británico, Norma DIN-1054).

Un aspecto importante en estos materiales es el grado de karstificación que presentan, para poder evaluar el riesgo local de subsidencia y colapsos del terreno. Aunque la ocurrencia tan dilatada de estos fenómenos en el tiempo resulta poco significativa, es importante evaluarlo para cada caso puntual.

b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Son materiales Duros, por lo que su excavación precisa el empleo de explosivos. El nivel superficial de alteración es fácilmente excavable.

*Estabilidad de taludes.* Presentan una estabilidad Alta. Al diseñar un talud habrá que prestar especial atención a la orientación de la estratificación respecto a la del talud ante el peligro de descalces y caída de bloques.

*Empuje sobre contenciones.* No serán necesarias.

*Aptitud para préstamos.* Se consideran Terrenos Aptos.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Constituyen Terrenos Adecuados y Seleccionados para coronación de terraplenes y pedraplenes. En desmontes en roca constituyen explanadas de tipo E-3.

Obras subterráneas. Se encuadran como materiales de la Clase II y Clase III (Media y Buena). Para anchuras de tunelación moderadas (0-8m) no se esperan problemas de sostenimiento.

### **6.3.3.3.3.**     Área II

#### *6.3.3.3.3..1     ZONA II<sub>1</sub>*

- Características Geológicas

En esta zona se incluyen todas las unidades predominantemente yesíferas que se corresponden con los Yesos de Los Arcos. Se trata de yesos alternantes con margas, en proporciones variables. Los Yesos de Los Arcos ocupan grandes extensiones en los núcleos de las principales estructuras anticlinales de esta zona (Anticlinales de Arguedas y Falces y sinclinal de Peralta). En la Hoja de Tudela aparecen únicamente en la Hoja 282-IV aparece en la esquina nororiental formando la terminación periclinal del Anticlinal de Arguedas.

La meteorización en los yesos produce una karstificación por disolución relativamente superficial, aunque en paquetes masivos y de cierto espesor puede ser más penetrativa. Las intercalaciones margosas disminuyen la compacidad natural del conjunto y aumentan su erosionabilidad. El tránsito entre roca sana y alterada es transicional. Su permeabilidad es baja a muy baja

En general, la permeabilidad es baja o muy baja, excepción hecha de los niveles someros karstificados. Localmente la permeabilidad y la propia karstificación pueden estar incentivadas por una fracturación intensa.

- Características geotécnicas

Las características fundamentales de los materiales que constituyen esta Zona son las siguientes: a) la presencia de intercalaciones de margas confiere en muchos casos una acusada heterogeneidad al conjunto, lo que se traduce en un comportamiento mecánico

no uniforme; b) la constante presencia de yesos presupone un alto contenido en sulfatos tanto en los suelos como, eventualmente, en las aguas que los drenan y por tanto es de esperar una fuerte agresividad a hormigones; y c) Los fenómenos de disolución y karstificación en yesos, aunque son relativamente superficiales, pueden originar importantes discontinuidades en el subsuelo y dar lugar a fenómenos de colapso del terreno.

- Características constructivas

- a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

La Norma DIN 1054 y el Código Británico establecen presiones admisibles del orden 10-20 kp/cm<sup>2</sup>, valores que deben reducirse a la mitad cuando el espesor de los tramos lutíticos aumenta o la disposición de la estratificación y grado de diaclasado son desfavorables. Se estima que la capacidad portante de estos materiales se sitúa entonces entre 5 y 10 kp/cm<sup>2</sup>, valores suficientes para el caso de edificios habituales en los que las cargas proyectadas son inferiores a 3-4 kp/cm<sup>2</sup>. El tipo de cimentación será en general superficial, previa eliminación del horizonte de alteración. Es de esperar la presencia de asientos diferenciales debido a la intercalación de niveles margosos blandos entre los paquetes de yesos.

- b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Son materiales de dureza media a dura, por lo que en su excavación puede ser preciso el empleo de explosivos, para los paquetes más duros, mientras que para los niveles margosos y arcillosos pueden ser excavados por medios mecánicos.

*Estabilidad de taludes.* Como se puede apreciar en los taludes existentes en la Hoja y en zona aledañas, no se registran fenómenos destacables de inestabilidad en taludes muy inclinados de escasa altura o en cortes naturales de baja a media pendiente. Sin embargo, el riesgo de caída de pequeños bloques y deslizamientos es muy elevado en taludes subverticales de cierta altura, especialmente en las zonas de voladizo por

descalce de los niveles lutíticos inferiores, tal como se observa en los farallones labrados por los ríos.

*Empuje sobre contenciones.* No serán necesarias para el caso de las margas, y a considerar para los yesos.

*Aptitud para préstamos.* No son materiales aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes salvo tratamiento con aditivos.

*Aptitud para explanada en carreteras.* En general deben constituir suelos aptos para explanadas de tipo E3, aunque se deberán tomar medidas de impermeabilización. Localmente pueden corresponder a suelos marginales, caso en que se procederá a la mejora de la explanada, con adición de suelo más adecuado.

*Obras subterráneas.* Se incluyen entre la Clase III (Calidad Media) y Clase IV (Calidad Mala) de la Clasificación de BIENIAWSKI (1979), jugando un papel importante la orientación de la estratificación y el grado de diaclasado y karstificación.

#### **6.3.3.3.4. Área III**

##### *6.3.3.3.4.1 ZONA III<sub>1</sub>*

- **Características Geológicas**

La Zona III<sub>1</sub> agrupa los materiales conglomeráticos de Fitero y Cascante. Litológicamente, esta constituido por bloques y conglomerados poligénicos, fundamentalmente de calizas mesozoicas, areniscas, cuarzo y cuarcita, muy heterométricos, cuyo tamaño medio oscila entre 5 y 50 cm, distribuidos en capas de espesor variable, comprendido entre 0,5 y 1,5 m de potencia.

El cemento es calcáreo muy recristalizado.

- **Características Geotécnicas**

No se dispone de ensayos geotécnicos, si bien, en otras zonas de Navarra, para este tipo de materiales se han realizado ensayos que han proporcionado los siguientes valores:

Cuadro Resumen de Características Geotécnicas (Roca inalterada)

Densidad	2,74 gr/cm <sup>3</sup>
Meteorización	2
R.Q.D.	80-100 %
Resistencia a Compresión Simple (Qu)	1010 Kp/cm <sup>2</sup>
Qu a partir del Point Load Test	1354 Kp/cm <sup>2</sup>
E. Brasileño ( $\sigma_{tb}$ )	79,1 Kp/cm <sup>2</sup>
Cohesión (c)	1,15 T/m <sup>2</sup>
Ángulo de Rozamiento ( $\phi$ )	23,2° (51 %)

Destacan los altos valores de resistencia obtenidos en el Ensayo de Compresión Simple y en el de Carga Puntual. Según la terminología de la ISRM, la resistencia a compresión simple será alta (>800 Kp/cm<sup>2</sup>) en los horizontes inalterados de areniscas y conglomerados y baja en los niveles limolítico-arcillosos (60-200 Kp/cm<sup>2</sup>).

- Características constructivas

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

El Código de Práctica Británico establece cargas admisibles de 44 Kp/cm<sup>2</sup>. Aún tomando los valores conservadores, la capacidad portante de estos materiales está asegurada a

tenor de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a tracción y a compresión. El tipo de cimentación será en general superficial, previa eliminación del recubrimiento superficial y de los niveles superiores más alterados.

Los posibles problemas de cimentación estarán en relación con un comportamiento mecánico desigual de los materiales, como consecuencia del grado de diaclasado y alteración de las areniscas.

b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Los niveles superficiales, por su alteración y diaclasado son ripables (Terreno Medio), pero en profundidad, precisarán el empleo de explosivos para su excavación.

*Estabilidad de taludes.* Constituyen materiales de gran estabilidad, con un ángulo de rozamiento interno muy elevado (50 %).

*Empuje sobre contenciones.* Las contenciones pueden ser necesarias en zonas de alteración fuerte. Pueden esperarse empujes de tipo Medio.

*Aptitud para préstamos.* Son Materiales Adecuados siempre que no se encuentren alterados y cumplan determinadas especificaciones relativas a granulometría y forma de las partículas.

*Aptitud para explanada en carreteras.* En desmontes, la categoría de explanada en roca corresponde a la E-3.

*Obras subterráneas.* Es difícil estimar el grado de fracturación y estado de las diaclasas en profundidad. En conjunto como considerarse un Terreno Medio, de Clase III (RMR=41-60 %), que para anchuras de tunelación normales no plantearía problemas de sostenimiento.

ZONA III<sub>2</sub>

---

- **Características Geológico-Geotécnicas**

La Zona III<sub>2</sub> está caracterizada en la presente Hoja por los materiales de la Facies Cascante.

Se trata de un conjunto de materiales arcillosos de tonos rojos con areniscas y conglomerados, que presentan un suave basculamiento, registrando valores moderados de buzamiento. Los términos lutíticos, aunque tienden a predominar en el conjunto, raramente conforman intervalos masivos, de modo que intercalan abundantes niveles de areniscas de potencia decimétrica y métrica. En la Hoja 282-III, (Cintruénigo), aparecen unos niveles de calizas margosas en esta unidad, que si bien geotécnicamente, son muy diferentes, se han incluido en este grupo debido a su poco espesor y desarrollo espacial.

En los niveles superficiales la meteorización produce una alteración y cambio de coloración de los términos arcillosos aumentando su erosionabilidad, mientras que en las capas de areniscas se produce una pérdida de cementación.

Debido a la destacada proporción de arcillas la permeabilidad puede considerarse bastante baja es bastante baja para el conjunto que integra la Zona. Los niveles más potentes de areniscas pueden desarrollarse pequeños acuíferos locales por fracturación.

La característica fundamental del macizo rocoso que constituye esta zona, es la alternancia de materiales de diferente litología (y por tanto, diferente comportamiento mecánico) en estratos y capas de espesor variable, factores estos que condicionan decisivamente el comportamiento geomecánico del conjunto.

Aunque no se dispone de ensayos de laboratorio en la Hoja, no obstante se exponen a continuación los resultados obtenidos en formaciones análogas existentes en otros sectores de la Comunidad Navarra:

<b>Cuadro Resumen de Características Geotécnicas (Roca inalterada)</b>
--

Clasificación de Casagrande		CL
% pasa tamiz nº 200		58,2-99,8
Límite líquido		37,25
Índice plasticidad		20,33
Humedad		14,5 %
PROCTOR Normal	Densidad máxima	2,05 gr/cm <sup>3</sup>
	Humedad óptima	11,6 %
Índice C.B.R.		4,4
Resistencia a compresión simple (lutitas sanas)		> 25 kp/cm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión simple (areniscas)		300-700 kp/cm <sup>2</sup>
R.Q.D. medio		80-100 %
Angulo rozamiento interno (□)		30°
Cohesión (c')		0,15

- Características Constructivas:

- a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN

La Norma DIN 1054 y el Código Británico establecen presiones admisibles del orden 20 kp/cm<sup>2</sup>, valores estos que deben reducirse a la mitad cuando el espesor de los tramos lutíticos aumenta o la disposición de la estratificación y grado de diaclasado son desfavorables. Se estima que la capacidad portante de estos materiales se sitúa entonces entre 6 y 10 kp/cm<sup>2</sup>, valores suficientes para el caso de edificios habituales en los que las cargas proyectadas son inferiores a 3-4 kp/cm<sup>2</sup>.

El tipo de cimentación será en general superficial, previa eliminación del horizonte de alteración. Es de esperar la presencia de asientos diferenciales y fenómenos de punzonamiento debido a la alternancia entre niveles de lutitas y areniscas, lo que además origina variaciones en las condiciones geotécnicas, entre ellas la facilidad de excavación

b.      CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Se trata de un conjunto heterogéneo en el que los materiales lutíticos son fácilmente excavables mientras que las areniscas constituyen niveles competentes que requieren el uso de explosivos, martillo o escarificador dependiendo de su espesor.

*Estabilidad de taludes.* No se observa ningún fenómeno de inestabilidad cuando la disposición de los materiales es transversal a la orientación de las laderas, y su buzamiento es superior a la pendiente. El riesgo de deslizamientos aumenta sensiblemente cuando aparecen tramos potentes de arcillas y debe considerarse la posibilidad de caída de bloques en escarpes subverticales areniscosos o en voladizo por descalce de los niveles lutíticos inferiores

*Empuje sobre contenciones.* Moderado en arcillas, nulo en arcillas.

*Aptitud para préstamos.* No son materiales Aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Los niveles arcillosos se consideran No Aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes. Los niveles de areniscas, constituyen por el contrario, Terrenos Adecuados.

*Obras subterráneas.* Se encuadran entre la Clase III (Calidad Media) y Clase IV (Calidad Mala) de la Clasificación de BENIAWSKI (1979), jugando un papel importante la orientación de la estratificación y el grado de diaclasado.

6.3.3.3.4..2      ZONA III<sub>3</sub>

- Características Geológico-Geotécnicas

Esta Zona comprende las unidades arcillosas de las Fm Tudela y Alfaro.

Litológicamente está constituida por un conjunto de materiales básicamente arcillosos de tonos rojos y beige con intercalaciones esporádicas de niveles de areniscas, yesos y algún nivel calizo. Presentan un suave basculamiento hacia el S-SSE, registrando valores bajos de buzamiento, entre 2 y 5 °.

En los niveles superficiales la meteorización produce una alteración y cambio de coloración de los términos arcillosos aumentando su erosionabilidad mientras que en las capas de calizas y areniscas se produce una pérdida de cementación.

Debido al marcado carácter arcilloso de la Zona la permeabilidad es muy baja, solamente en los niveles más potentes de areniscas y calizas pueden desarrollarse pequeños acuíferos locales por fracturación.

La presencia de sulfatos es poco importante aunque las trazas de yeso (cristales especulares, nódulos aislados y venas) pueden concentrarse localmente en algunos intervalos. El contenido en materia orgánica debe considerarse en los horizontes próximos a los niveles carbonatados debido a la existencia de intercalaciones de lignitos.

De los datos disponibles en áreas próximas se deduce que los límites de Casagrande son los siguientes:

Límite líquido: 42,69-45,19

Límite plástico: 22,93-23,83

Índice de plasticidad: 19,76-21,36

- Características constructivas:

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN

Los valores normalmente aceptados de cargas admisibles para arcillas son de 1,3 a 3 kp/cm<sup>2</sup>. La profundidad mínima de cimentación se estima en 1,5 a 2 m, debido a que suelen estar alteradas en superficie con el consiguiente descenso de las presiones que pueden admitir.

Entre los problemas de cimentación se pueden prever los siguientes: a) variación del horizonte alterado, que puede provocar asentamientos diferenciales; b) intercalaciones de materiales competentes, calizas y areniscas, que producen variaciones en las condiciones geotécnicas, entre ellas la facilidad de excavación, y c) presencia ocasional de materia orgánica

c. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Son materiales fácilmente excavables.

*Estabilidad de taludes.* Se pueden dar problemas de deslizamientos por la existencia de tramos potentes de arcillas en zonas de taludes verticales o subverticales

*Empuje sobre contenciones.* Medios en arcillas

*Aptitud para préstamos.* No son materiales aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Son suelos de tipo E2 no aptos o marginales, que precisarán la extensión sobre ellos de una explanada mejorada.

*Obras subterráneas.* Se encuadran en la Clase IV (calidad Mala) de la Clasificación de BIENIAWSKI (1979).

### 6.3.3.3.5. Área IV

#### 6.3.3.3.5.1 ZONA IV<sub>1</sub>

- Características Geológicas

Comprende el conjunto de formaciones cuaternarias de génesis aluvial-fluvial (terrazas, llanura aluvial, etc.). Éstas se caracterizan por presentar una proporción elevada de términos clásticos (gravas y arenas) en el depósito y por ocupar áreas llanas (zonas deprimidas de los valles y superficies medias y altas)

Predominan los materiales aportados por los dos ríos principales de la Hoja correspondiendo mayoritariamente a terrazas que cubren casi totalmente la mitad suroriental de la Hoja. Cabe mencionar también los materiales pertenecientes a los.

Litológicamente es patente el predominio de gravas y en menor proporción de arenas, constituyendo depósitos generalmente no consolidados, y en algunos casos es apreciable el contenido en finos (meandros abandonados, terrazas bajas, etc.)

- Características Geotécnicas

Se trata de materiales poco consolidados, donde los problemas geotécnicos están condicionados por su disposición. En la presente Hoja no se dispone de ensayos geotécnicos. No obstante se presentan a continuación algunos resultados de ensayos efectuados sobre depósitos semejantes en otros puntos de la Comunidad Navarra.

<b>6.3.3.3.5.2 Cuadro Resumen de Características Geotécnicas</b>	
Contenido en Grava (>5mm)	65 %
Contenido en Arena (5-0.08mm)	20 %
Contenido en Finos (<0.08mm)	15 %

Límite Líquido (WL)	-
Límite Plástico (WP)	No plástico
Índice de Plasticidad (IP)	-
Clasificación de Casagrande	GW-GM
Densidad Máxima Proctor Normal	2,13 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad Óptima Proctor Normal	7 %
Ángulo de Rozamiento Interno ( $\phi$ )	40 °
Cohesión (C')	2,20

Los materiales poseen, en general, una permeabilidad alta por permeabilidad intergranular. Las terrazas bajas y otros depósitos fluviales relacionados, presentan un nivel freático continuo y somero. Las terrazas medias, altas y abanicos constituyen acuíferos locales colgados.

- Características Constructivas

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

Para el conjunto de los materiales que definen la Zona, se estima una capacidad portante variable entre 1 y 3,5 Kp/cm<sup>2</sup>, dependiendo de que se trate de un limo de consistencia más o menos rígida o una grava de compacidad alta, y de la presencia o ausencia de nivel freático.

El tipo de cimentación será superficial, salvo cuando no se reúnan las condiciones anteriores, las cargas proyectadas sean superiores a las dadas, en el caso de depósitos aluviales (con alto riesgo de avenidas), que será necesario encontrar niveles profundos más resistentes (incluso el sustrato). En estos casos, el tipo de cimentación será semiprofunda.

Los condicionantes geotécnicos más importantes estarán relacionados con la posición del nivel freático, que puede dar lugar a subpresiones y fenómenos de inestabilidad en excavaciones y obras, así como agotamientos importantes. Por otro lado, la presencia eventual de intercalaciones de arcillas blandas puede provocar asientos diferenciales no admisibles y sobre sustrato yesífero es elevado el riesgo de hundimientos del terreno por colapso.

b.      CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Constituyen Terrenos Medios, su excavación puede efectuarse por medios mecánicos sin dificultad.

*Estabilidad de taludes.* La estabilidad del talud dependerá de la profundidad del nivel freático y del tipo de unidad morfológica. En general, para alturas superiores a 3 m pueden proyectarse taludes 3H:4V. De manera ocasional, pueden producirse pequeños desprendimientos de escasa relevancia en los bordes de taludes subverticales.

*Empujes sobre contenciones.* Serán de tipo Medio. En zonas de gravas varían de Altos a Bajos en función de la profundidad del nivel freático.

*Aptitud para préstamos.* En general constituyen Terrenos Aptos, ocasionalmente marginales. Los tramos de gravas se consideran Aptos, si bien precisan una clasificación que elimine los tamaños gruesos (8-10 cm).

*Aptitud para explanada en carreteras.* Se trata esencialmente de suelos Aptos constituyendo explanadas de tipo E2 y E3, exceptuando los niveles de gravas formadas por cantos de gran tamaño que precisen una regularización de la superficie o aquellos fondos de desmonte que queden en términos lutíticos.

*Obras subterráneas.* La mayoría de las obras subterráneas de envergadura afectan al sustrato. Sin embargo en obras de menor diámetro (conducciones subterráneas) encontrarán Terrenos Difíciles, según lo establecido en la metodología, que precisarán entibación total.

6.3.3.3.5..3 ZONA IV<sub>2</sub>

- Características Geológicas

Se integran en esta Zona las formaciones cuaternarias desarrolladas característicamente a la salida de los barrancos y en algunas laderas (conos de deyección y glaciares) y están formados por depósitos fangosos con cantos más o menos dispersos.

Presentan por tanto una cierta pendiente deposicional y gradación clástica grosera a distancia creciente del relieve.

Litológicamente constituyen un depósito bastante heterogéneo formado por una matriz fangosa que engloba cantos poco rodados en proporciones muy variables y cuya naturaleza depende de la litología del área de procedencia.

- Características Geotécnicas

Constituyen materiales sueltos de muy baja a nula consolidación cuyos problemas geotécnicos derivan directamente de su posición geomorfológica. No se cuenta con información procedente de ensayos realizados en el ámbito de la Hoja de modo que los parámetros geotécnicos se han obtenido por correlación con unidades de comportamiento similar presentes en otros sectores de la Comunidad Navarra.

<b>6.3.3.3.5..4 Cuadro Resumen de Características Geotécnicas</b>	
Humedad	20,5 %
Contenido en Finos (<0.08mm)	75-80,4 %
Límite Líquido (WL)	28-40,4
Índice de Plasticidad (IP)	12-19,2
Clasificación de Casagrande	GC-CL

---

Densidad Máxima Proctor Normal	1,8 gr/cm <sup>3</sup>
Humedad Óptima Proctor Normal	15-12,7 %
Ángulo de Rozamiento Interno ( $\phi$ )	30,5-38 <sup>00</sup>
Cohesión (C')	1,0
Contenido en sulfatos	0,01%

Los datos expuestos corresponden a suelos limo-arcillosos de baja plasticidad de baja capacidad portante, consistencia media y valor alto del índice CBR, no obstante y principalmente en función de los contenidos en fracción clástica, puede variar ostensiblemente el grado de plasticidad, cohesión y comportamiento en explanadas

Desde el punto de vista hidrogeológico corresponden a materiales de baja permeabilidad, eventualmente media, caso en el que permiten cierta circulación de agua subterránea y, en principio, no deben presentar problemas de drenaje dada la pendiente deposicional natural.

- Características Constructivas

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

Se consideran cargas admisibles entre 1,5-2,5 Kp/cm<sup>2</sup>. En general, se debe cimentar sobre el sustrato rocoso, mediante cimentación superficial o semiprofunda por pozos, en función de la potencia de los materiales, con el fin de evitar posibles fenómenos de inestabilidad, especialmente en áreas con pendientes apreciables. Hay que prestar atención al contenido en humedad ante la posibilidad de cambios volumétricos.

b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Se consideran Terrenos Medios; su excavación puede realizarse normalmente sin dificultad por medios mecánicos.

*Estabilidad de taludes.* Constituyen depósitos no consolidados estables en condiciones naturales si no se alteran sus condiciones de equilibrio.

*Empuje sobre contenciones.* En general, serán de tipo Medio.

*Aptitud para préstamos.* Previa eliminación de la cubierta vegetal, constituyen suelos Marginales, eventualmente Adecuados en función de la proporción en fangos.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Los fondos de desmontes quedarán en suelos inadecuados a tolerables, constituyendo explanadas de categoría E1 o inferior.

*Obras subterráneas.* Normalmente este tipo de obras afectará a materiales del sustrato, dado el reducido espesor de los depósitos. No obstante, para obras de pequeña envergadura, deberán calificarse como Terrenos Difíciles, que pueden precisar entibación total.

#### 6.3.3.3.5..5 ZONA IV<sub>3</sub>

- Características Geológico-Geotécnicas

Esta Zona está definida por depósitos cuaternarios generados por inestabilidades activas relacionadas con procesos de gravedad (coluviones y aluvial-coluvial).

En la Hoja su desarrollo se localiza en las laderas (coluviones), a veces como formas de enlace entre distintos niveles de terrazas o como derrame de alguna de estas.

Su permeabilidad está condicionada por el contenido en finos, siendo muy alta en los desprendimientos y francamente baja en los deslizamientos. Por otra parte la pendiente natural de las formas de depósito generadas facilita la evacuación de aguas por escorrentía por lo que difícilmente se registran problemas de drenaje.

Constituyen terrenos con importantes problemas geotécnicos derivados básicamente de las inestabilidades gravitacionales registradas, heterogeneidad de los depósitos y litología

yesífera o yesífero-arcillosa. No se dispone de ensayos geotécnicos específicos para este tipo de materiales.

- Características constructivas

a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN.

No son terrenos aptos para el emplazamiento de construcciones que requieran cimentación debido al riesgo de movilización de materiales. En los casos que se proceda a la estabilización del área de procedencia de los materiales movilizados se deberá recurrir a la retirada de estos últimos para establecer la cimentación en suelos de características más favorables, o sobre sustrato rocoso.

b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA.

*Excavabilidad.* Se prevén graves dificultades de excavación dada la presencia de bloques y grandes masas de yesos para cuya retirada deberán emplearse consideraran medios especiales

*Estabilidad de taludes.* Constituyen depósitos no consolidados ya de por sí inestables en condiciones naturales de modo que deben adoptarse ángulos muy bajos (<30º) para los taludes de desmonte en estos materiales.

*Empuje sobre contenciones.* Pueden ser altos en función de la incidencia de los procesos gravitacionales activos.

*Aptitud para préstamos.* Constituyen materiales no aptos para su uso en terraplenes y pedraplenes, salvo tratamiento con aditivos

*Aptitud para explanada en carreteras.* En fondos de desmonte definen explanadas tipo E-1 o de categoría inferior debido las desfavorables características litológicas, heterogeneidad e irregularidades del terreno.

*Obras subterráneas.* Sólo pueden verse afectadas obras de pequeña envergadura, desarrolladas a escasa profundidad, para las que deben considerarse terrenos francamente desfavorables.

#### 6.3.3.3.5.6 ZONA III<sub>4</sub>

- Características Geológico-Geotécnicas

En esta Zona se incluyen una serie de depósitos poco consolidados asociados a la red fluvial actual, así como aquellos que presentan un alto contenido en finos y de origen poligénico. Todos ellos presentan un cierto grado de inundabilidad, en función de las fluctuaciones del nivel de agua. También se han incluido aquí una serie de depósitos de naturaleza limo-arcillosa (unidad 45) que se localizan en zonas deprimidas con un cierto drenaje deficiente. Presentan una potencia variable, aunque generalmente no sobrepasan los 5 m...

Desde el punto de vista hidrogeológico presentan una permeabilidad baja, debido a su carácter predominantemente lutítico. Se trata de depósitos poco consolidados que se comportan como un suelo de consistencia media-blanda.

- Características constructivas

#### a. CONDICIONES DE CIMENTACIÓN

A falta de ensayos más precisos pueden considerarse valores contenidos en las diferentes Normas y Códigos. Así, el Código de Práctica Británico establece para este tipo de materiales presiones admisibles entre 0,75 y 3 kp/cm<sup>2</sup>, esperándose asientos de consolidación a largo plazo. Para la Norma DIN 1054 a una profundidad de cimentación de 2 m, las cargas admisibles son del orden de 2,5-3 kp/cm<sup>2</sup>, esperándose asientos en torno a 4 cm.

No obstante aunque presenten una capacidad portante suficiente en algunos casos para determinados tipos de edificios, se localizan en emplazamientos muy desfavorables (áreas

endorreicas, zonas de recarga del carst: dolinas, sumideros, etc.) para proyectar sobre ellos cargas concentradas. Por este motivo, y a falta de estudios detallados, se aconseja no utilizar estos materiales como terrenos de cimentación.

b. CONDICIONES PARA OBRAS DE TIERRA

*Excavabilidad.* Estos materiales se consideran terrenos Medio-Blandos, su excavación podrá realizarse por medios mecánicos sin ningún tipo de problemas.

*Estabilidad de taludes.* En general van a depender de la extensión del afloramiento y del espesor de los materiales. Pueden producirse pequeños deslizamientos de carácter superficial.

*Empuje sobre contenciones.* Serán variables en función del grado de saturación de los materiales. Pueden considerarse de bajos a medios.

*Aptitud para préstamos.* Se consideran materiales no aptos para préstamos. En algunas situaciones pueden constituir terrenos marginales en cimientos y núcleos de terraplenes pero nunca en la coronación de los mismos.

*Aptitud para explanada en carreteras.* Se trata de Materiales No Aptos.

*Obras subterráneas.* En general, las obras subterráneas importantes afectarán al sustrato. Las obras de menor entidad, encontrarían un terreno tipificado como "Difícil".

## 7. BIBLIOGRAFIA

ALASTRUE, E., 1958, Nota sobre la estratigrafía de Las Bardenas en su extremo meridional. N. y C. del IGME, núm. 50. fac. 2. Madrid.

AZANZA, B., 1986, Estudio geológico y paleontológico del Mioceno del sector Oeste de Borja (prov. Zaragoza). Cuadernos de Estudios Borjanos, 17-18.

CASTIELLA, J.; SOLE, J. y DEL VALLE, J., 1978, Mapa y Memoria Geológica de Navarra a escala 1:200.000. Servicio Geológico, Diputación Foral de Navarra.

CRUSAFONT M.; TRUYOLS, J.; RIBA, O., 1966, Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Terciario continental de Navarra y Rioja. Not. y Com. del IGME, nº. 90.

CRUSANFONT, M. y GLOPE, J.M., 1974, Nuevos yacimientos del Terciario Continental del NE de España. Acta Geol. Hisp., tomo IX, núm. 3.

DEL VALLE, J.; VILLANUEVA, F., 1988, Síntesis Geológica de Navarra. Publicaciones del Gobierno de Navarra.

FLORISTAN SAMANES, A., 1951, La Ribera Tudelana de Navarra. Diputación Foral de Navarra e Inst. J.S.Elcano, C.S.I.C., 316. Zaragoza.

GOBIERNO DE NAVARRA, 1992, Mapa y Memoria de la Geología de Navarra a escala 1:200.000. Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones.

GONZALEZ, I.; GALAN, E., 1984, Mineralogía de los materiales terciarios del área de Tarazona-Borja-Ablitas (Depresión del Ebro). Estudios Geológicos 40.

GRACIA PRIETO, J., 1985, Geomorfología de Las Bardenas orientales. Tesis de Licenciatura. Fac. Ciencias. Univ. de Zaragoza.

GRACIA, F.J., 1985, Las formaciones aluviales de la depresión presomontano de Cinco Villas. Bol. Geol. y Min., 96-6.

GRACIA, J.; SIMON, J.L., 1986, El campo de fallas miocenas de la Bárdena Negra (prov. de Navarra y Zaragoza). Bol. Geológico y Minero. T. XCVII-VI.

GRACIA J.; GUTIERREZ, M.; SANCHO, C., 1985, Las etapas terminales del Neógeno-Cuaternario de la Depresión del Ebro en la Plana de la Negra. Actas de la I Reuniao do Cuaternario Iberico. vol II.

HERNANDEZ-PACHECO, F., 1949, Las Bardenas Reales. Rasgos fisiográficos y geológicos. Rev. Príncipe de Viana, año 10, núm. 37.

I.G.M.E., 1928, Datos relativos a sondeos en Navarra. Informe del Instituto Geológico y Minero de España (10543)

I.G.M.E., 1971, Mapa Geológico de síntesis a escala 1:200.000, Hoja nº 22 (Tudela). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.

I.G.M.E., 1973, Mapa de Rocas Industriales a escala 1:200.000, Hoja nº 22 (Tudela). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.

I.G.M.E., 1977, Memoria del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (MAGNA), Hoja nº 282. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.

I.G.M.E., 1980, Síntesis de las investigaciones geológico-mineras realizadas por el I.G.M.E. en Navarra. Informe del Instituto Geológico y Minero de España.

I.G.M.E., 1987, Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.

MUÑOZ, A. y SALVANY, J.M., 1990, El sistema lacustre evaporítico del margen ibérico de la Cuenca del Ebro (Mioceno inferior). En Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la Zona de Levante. ed. F.ORTI y J.M.SALVANY, Univ. Barna.

ORTI, F.; SALVANY, J.M., 1986, Programa de investigación de las formaciones evaporíticas en Navarra (potasas excluidas). Vol. I, Estudio Geológico, Gobierno de Navarra.

ORTI, F.; SALVANY, J.M.; ROSELL, L.; PUEYO, J.J.; INGLES, M., 1986, Evaporitas antiguas (Navarra) y actuales (Los Monegros) de la Cuenca del Ebro. Guía de excursiones del XI Congreso Español de Sedimentología. Barcelona.

PEREZ, A.; MUÑOZ, A.; PARDO, G. y ARENAS, C., 1989, Estratigrafía y sedimentología de Terciario de la región Tarazona-Tudela (sector navarro-aragonés de la Depresión del Ebro). Turiaso IX, t.1.

PEREZ, A.; MUÑOZ, A.; PARDO, G.; ARENAS, C.; VILLENA, J., 1988, Características de los sistemas lacustres en la transversal Tarazona-Tudela (sector navarro-aragonés de la cuenca del Ebro). II Congreso Geológico de España, Vol. simposiums. Granada.

RIBA, O., 1964, Estructura sedimentaria del Terciario Continental de la Depresión del Ebro en su parte riojana y Navarra. Aportación española al XX Congr. Geogr. Intl. Reino Unido. Zaragoza.

SALVANY, J.M., 1989, Las formaciones evaporíticas del Terciario continental de la Cuenca del Ebro en Navarra y La Rioja. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.

SALVANY, J.M., 1989, Los sistemas lacustres evaporíticos del sector navarro-riojano de la Cuenca del Ebro durante el Oligoceno y Mioceno inferior. Acta Geol. Hisp., 24, 3-4.

SALVANY, J.M., 1989, Aspectos petrológicos y sedimentológicos de los yesos de Ablitas y Monteagudo (Navarra): Mioceno de la Cuenca del Ebro. Turiaso IX, 1.

SALVANY, J.M., 1989, Ciclos y megaciclos evaporíticos en las form. Falces y Lerín, Oligoceno-Mioceno inf. de la Cuenca del Ebro (Navarra-La Rioja). XII Congreso Español de Sedimentología, Leioa (Vizcaya).

SALVANY, J.M.; ORTI CABO, F., 1987, La paragénesis de sulfatos de Ca y Na en el Mioceno continental de Alcanadre-Arrübal (La Rioja) y San Adrián (Navarra). Bol. Soc. Esp. de Mineralogía, 10-1.

SALVANY, J.M. y ORTI, F., 1992, El yacimiento glauberítico de Alcanadre: procesos sedimentarios y diagenéticos (Mioceno inferior, Cuenca del Ebro). En Recursos minerales españoles, ed. CSIC, Madrid.

SOLE SABARIS, L., 1954, Sobre la estratigrafía de Las Bardenas y los límites del Oligoceno y del Mioceno en el sector occidental de la Depresión del Ebro. Real Soc. Esp. de Hist. Nat., tomo Extr. Hernández Pacheco.