

MAPA PREVISOR DE RIESGOS POR EXPANSIVIDAD DE ARCILLAS EN ESPAÑA A ESCALA 1:1.000.000



F. J. AYALA CARCEDO
M. FERRER GIJON

C. OTEO MAZO
J. L. SALINAS RODRIGUEZ

SERIE: GEOLOGIA AMBIENTAL



INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Madrid, 1986

CENTRO DE ESTUDIOS Y EX

CEDEX

00947

MAPA PREVISOR DE RIESGOS POR EXPANSIVIDAD DE ARCILLAS EN ESPAÑA A ESCALA 1:1.000.000

SERIE: GEOLOGIA AMBIENTAL

F. J. AYALA CARCEDO

Ingeniero de Minas
Jefe del Área de Geotecnia, I.G.M.E.

M. FERRER GIJON

Licenciada en Geología
División de Geotecnia, IGME

CARLOS OTEO MAZO

Dr. Ingeniero de Caminos
Coordinador de Programa
Técnico-Científico del Laboratorio de
Geotecnia, CEDEX

J. L. SALINAS RODRIGUEZ

Licenciado en Geología
Laboratorio de Geotecnia, CEDEX



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS

© INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

I.S.B.N.: 84-7474-401-6

Depósito legal: M. 14723-1987

N.I.P.O.: 232-87-003-1

Impreso por: Reprográficas Almansa, s. a.

Teléf. 254 28 01/02/03

C/. Almansa, 33 - 28039 MADRID

AGRADECIMIENTOS

Las personas que han intervenido en la realización de este Documento quieren expresar su agradecimiento a diversas entidades públicas y privadas por la colaboración prestada durante el desarrollo de este trabajo, tanto facilitando datos específicos, como expresando opiniones generales.

Concretamente, se quiere agradecer la colaboración de las siguientes organizaciones, que contestaron a una encuesta efectuada con alcance nacional:

- ASLAND, S. A.
- CIMSA.
- Equipo de Asistencia Técnica, S. A.
- GEOS, S. A.
- Geotécnica y Cimientos, S. A.
- GEOTEYCO, S. A.
- Ingeniería de Sondeos, S. A.
- Instituto Geológico y Minero de España.
- INTEMAC, S. A.
- KRONSA, S. A.
- Laboratorios de Carreteras y Geotécnica «José Luis Escario».
- Laboratorio de Ensayos del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.
- Laboratorio INCE de Almería.
- Laboratorio INCE de Cuenca.
- Laboratorio INCE de Granada.
- Laboratorio INCE de Madrid.
- Laboratorio INCE de Valladolid.
- Laboratorio Proyex Valencia, S. A.
- LOSAN, Mecánica del Suelo, S. A.

Además, quiere reconocerse la colaboración prestada por diversos profesionales que han facilitado informaciones personales y datos sobre su propia experiencia. Entre estas personas los autores de este Documento quieren destacar especialmente los comentarios del Profesor Jiménez Salas, de la Real Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales de España, así como los de los profesores D. José Luis Justo Alpañés, de la Universidad de Sevilla, y de D. José M.^a Rodríguez Ortiz, de la Universidad Politécnica de Madrid. A este último y a D. Javier Castanedo se quiere agradecer, además, la colaboración prestada durante la edición de este trabajo. Igualmente se agradece la colaboración prestada por D. Ventura Escario, D. Alcibiades Serrano, D. Santiago Uriel, D. Angel Uriel, D. Jesús Sáez, D. Antonio Soriano, D. Jesús Moreno, D. Román Román, D. Francisco Travesedo y D. Gregori Jaume Nadal así como la participación de D. Isabelo Ferrero, D. Juan Plaza y D. Manuel Fernández en todo el proceso de tratamiento y elaboración del Mapa que acompaña a esta Memoria, y a D. Carlos Barba las fotografías con el microscopio electrónico.

INDICE

RESUMEN	9
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCION	11
2. ANTECEDENTES	12
3. EL FENOMENO DE EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS ARCILLOSOS.....	14
3.1. Condiciones para la manifestación de la expansividad	14
3.2. Mecanismos de expansión	14
3.3. Factores intrínsecos vinculados a la expansividad	15
3.4. Factores extrínsecos vinculados a la expansividad	15
4. GEOLOGIA DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS	17
4.1. Mineralogía	17
4.2. Génesis	19
4.3. Facies	21
4.4. Textura.....	23
4.5. Historia geológica	25
4.6. Geomorfología	25
4.7. Incidencia de la composición y textura en la expansividad	29
5. IDENTIFICACION GEOTECNICA DE SUELOS EXPANSIVOS.....	30
5.1. Métodos de valoración de la expansividad.....	30
5.2. Técnicas indirectas de valoración de la expansividad	31
5.3. Técnicas directas de valoración de la expansividad	33
6. FISIOGRAFIA DE LA EXPANSIVIDAD EN ESPAÑA.....	35
6.1. Clasificación climática de España	35
6.2. Vertisuelos	36
6.3. Suelos arcillosos de origen volcánico	38
6.4. Sustratos arcillosos paleozoicos	39
6.5. Sustratos arcillosos mesozoicos	39
6.6. Sustratos arcillosos cenozoicos	40

7. CLASIFICACION DE SUELOS POTENCIALMENTE EXPANSIVOS EN ESPAÑA	40
7.1. Metodología	40
7.2. Valoración de la expansividad a partir de índices sencillos	42
7.3. Indices y criterios de clasificación utilizados. Aportaciones.....	44
7.3.1. Criterios climáticos	44
7.3.2. Criterios mineralógicos y texturales	44
7.3.3. Indices de plasticidad.....	44
7.3.4. Indices de expansividad de Lambe.....	45
7.3.5. Indices representativos del hinchamiento libre.....	45
7.3.6. Indices representativos de la presión de hinchamiento	45
7.3.7. Otros índices.....	45
7.4. Criterios de actuación	46
7.5. Datos utilizados.....	47
7.5.1. Base geológica	47
7.5.2. Base geotécnica	47
7.6. Significado de la clasificación realizada	47
7.7. Unidades cronolíticas en los sustratos arcillosos españoles	49
7.8. Riesgo de expansividad de las unidades cronolíticas	50
8. ANALISIS COMPARATIVO DEL RIESGO DE EXPANSIVIDAD EN LOS DIFERENTES AMBITOS TERRITORIALES ESPAÑOLES	50
9. SISTEMAS DE CIMENTACION EN ARCILLAS EXPANSIVAS.....	55
9.1. Generalidades.....	55
9.2. Principios básicos del proyecto de cimentaciones sobre suelos expansivos	56
9.3. Tipología de cimentaciones	57
9.4. Precauciones adicionales	60
10. BIBLIOGRAFIA.....	63

RESUMEN

El Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Arcillas en España muestra las formaciones litológicas con arcillas potencialmente expansivas a escala 1:1.000.000 y clasifica en 4 grados el riesgo de expansividad presumible de dichas formaciones.

El fenómeno de inestabilidad volumétrica de los suelos es complejo y está sujeto a numerosas variables. Sin embargo, y en circunstancias normales, depende en último término de la capacidad expansiva intrínseca de las formaciones arcillosas y de las circunstancias climáticas existentes.

Se ha pretendido establecer un documento que, aunque de alcance limitado, permita evaluar con rapidez, en cualquier punto del territorio español, el riesgo probable de expansividad que existe en esa zona, a fin de que sirva de posible señal de alarma a la hora de proyectar cimentaciones de edificios y obras públicas.

Como resultado de los trabajos de recopilación y análisis, se ha elaborado el Mapa que acompaña a esta Memoria, en el que se distinguen: a) *Sustrato rocoso*. b) *Recubrimientos*. c) *Materiales arcillosos*, clasificados en cuatro grados de peligrosidad respecto de los posibles cambios de volumen.

Además, en esta Memoria se ha hecho una revisión de los diversos factores que inciden en la expansividad de las arcillas, analizando el potencial expansivo de los tipos más característicos de arcillas españolas. Para ello, se han agrupado por *formaciones cronolíticas* (edad y litología), y por *ámbitos climáticos*, y se han aplicado a dichas formaciones diversos criterios geotécnicos que permiten evaluar el potencial expansivo. Como complemento se describen las características geológicas de las arcillas expansivas, las técnicas aconsejables para detectar la expansividad y las actuaciones utilizadas en la práctica para prevenir daños por expansividad.

ABSTRACT

The Map of Risks from Clay Expansiveness in Spain shows, at 1:1.000.000 scale, the lithological formations with content of expansive clays, and introduces an expansiveness risk classification divided in four different groups.

Volume change in soils is a very complex process that depends on many variables. Nevertheless, in normal conditions it is a function of the intrinsic swelling capacity of the clay formations and the climatic conditions of the zone.

The aim of this work has been the elaboration of a map from which it is possible to get a quick and simple evaluation of the risk from clay expansiveness at any point of the Spanish territory, to use it in relation to foundation design of public works and building.

From the analysis of all the collected information, coming from very different sources, the elaboration of both, the map and the adjointed memory, has been possible. The work is divided in three parts:

a) *Non-argillaceous substratum*, b) *Overburden* and c) *Clayey materials*, classified in four group according to the risk of expansiveness quantified through the volume change.

Besides, a review of the different factors governing the swelling process of clays has been carried out with special references to the expansiveness potential of the Spanish clays. In this way, the clayey soils have been grouped according to *chrono-lithologic formations* (differenced by geologic age and lithology) and *climatic conditions*, applying to such formations those geotechnical criteria that lead to the evaluation of its expansiveness potential.

Finally, the geological characteristics of the expansive clays, the adequate techniques for swelling evaluation and the practical procedures for damage prevention in buildings due to soil swelling are described.

1. INTRODUCCION

El Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Arcillas en España delimita zonas en que se presume una expansividad similar para las arcillas, la cual se ha clasificado en 4 grados. El término *expansividad* define la capacidad del suelo para experimentar cambios de volumen al modificarse las condiciones de humedad, o para generar presiones si este cambio le es impedido.

Aunque determinados suelos o rocas pueden experimentar hinchamientos derivados de una descompresión o de modificaciones mineralógicas o texturales al acceder a cotas superficiales, el fenómeno de expansividad designa habitualmente la propiedad de algunos componentes arcillosos de los suelos, en especial los montmorilloníticos, de modificar su estructura laminar por adsorción de moléculas polares. No sólo puede producirse hinchamiento del suelo, sino, evidentemente, retracción, si tiene lugar una aproximación de las partículas de arcilla por desecación.

Así pues, la capacidad expansiva de un suelo depende estrechamente de su naturaleza mineralógica, que deberá ser arcillosa en proporción significativa. De aquí que se utilice normalmente el término de *arcillas expansivas* como sustitutivo de *suelos expansivos*, ya que son los componentes arcillosos del suelo los que pueden exhibir expansividad. De su mineralogía, tamaño y organización textural dependerá su capacidad intrínseca de experimentar cambios de volumen, y de la composición, porcentaje de arcilla, grado de cementación y textura globales resultará la del suelo.

Debe tenerse presente, sin embargo, que no todas las formaciones expansivas son arcillosas. Algunos materiales no arcillosos, como se ha señalado con anterioridad, pueden eventualmente experimentar cambios de volumen. Entre ellos hay que referirse a ciertos tipos de *pizarras* de bajo metamorfismo y a rocas evaporíticas con *anhidrita* (mineral este último susceptible de transformarse por hidratación en yeso, con aumento de volumen). Estas formaciones quedan fuera del ámbito de este trabajo, limitado a las arcillosas.

Para poder manifestarse las propiedades intrínsecas del suelo es necesario que éste pueda experimentar cambios de humedad y, para ello, son precisas determinadas condiciones medioambientales, vinculadas básicamente al clima, pero también relacionadas con la posición del nivel freático, vegetación, profundidad, estructura del suelo y posición estratigráfica. A ello hay que añadir, muy en especial, las alternativas impuestas por la actuación humana que, necesariamente, modifican el equilibrio secular del entorno, en particular en lo referente a las condiciones de admisión y eliminación de agua.

Se comprende que la expansividad es un fenómeno complejo, sujeto a numerosas variables, resultando por ello difícil de cuantificar.

Para la delimitación de las zonas de equi-expansividad potencial a que se llega en este trabajo se han tenido en cuenta los criterios básicos anteriormente reseñados. Para ello se han agrupado las formaciones en unidades sedimentarias que reunieran una litología y edad geológica comunes (*unidades cronolitológicas*). Se presumía, así, una mineralogía, textura y estructura equiparables que permitieran defi-

nir un potencial expansivo global semejante para cada unidad cronolitológica. En total se han clasificado 7 litologías en 4 edades geológicas, simplificación a la que se ha llegado tras diversas consideraciones prácticas, de orden cartográfico.

Sin embargo, como queda dicho, este potencial expansivo está condicionado por el medio climático, por lo que el riesgo de expansividad de la unidad cronolitológica queda matizado en la cartografía realizada por las condiciones climáticas locales.

El grado de expansividad de las diferentes unidades cronolitológicas se ha definido en base a unas 1.400 muestras con ensayos de expansividad y del orden de 2.000 muestras con ensayos de plasticidad. Se han tenido en cuenta los criterios de evaluación de la expansividad más aceptados y otros puestos a punto durante la realización del presente trabajo. Se han consultado, además, numerosos Informes y Estudios en que se valoraba o estaba implícito el grado de expansividad de los suelos, a veces con actuaciones derivadas de problemas de expansividad, realizados tanto por Organismos Públicos como por Entidades privadas, así como publicaciones diversas, incluyendo varias Tesis Doctorales. Finalmente, se ha tenido acceso a actuaciones concretas, con frecuencia mediante comunicación personal.

La cartografía realizada no recoge el riesgo expansivo de los *recubrimientos* (formaciones superficiales predominantemente cuaternarias), puesto que se trata, en general, de materiales de una gran variabilidad litológica y a menudo con predominio de gruesos, en especial en formaciones fluviales (aluviales, terrazas). Por otra parte, tienen a veces un espesor muy moderado y una morfología frecuentemente irregular. Se ha optado por dilucidar el riesgo expansivo presumible del sustrato, señalando, sin embargo, la presencia de dichos recubrimientos en el propio Mapa.

Hay que añadir, por último, que la escala de trabajo ha impedido reflejar algunos posibles afloramientos arcillosos, localmente significativos pero no cartografiados. Esta circunstancia se ha puesto de manifiesto muy en especial en zonas volcánicas como las Islas Canarias, donde algunas formaciones arcillosas tienen una entidad (por su trascendencia geotécnica) superior a la de meros recubrimientos. Se hará referencia a algunas de ellas a lo largo de la Memoria.

El propósito fundamental del *Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Arcillas en España* es advertir de la posible existencia de suelos de carácter expansivo en un entorno geográfico concreto. Esta posibilidad deberá ser confrontada, en cada caso, mediante ensayos específicos de expansividad del suelo, puesto que, como se irá viendo a lo largo de

esta Memoria, las variaciones del potencial expansivo, aún dentro de una zona calificada como de muy alta expansividad, pueden ser importantes.

A título de ejemplo, se señalará, en este sentido, que contrastando los resultados obtenidos en el ensayo de expansividad de Lambe con suelos procedentes de una de las formaciones litológicas de mayor conflictividad en cuanto a su potencial expansivo (las peñuelas arcillosas de la ciudad de Madrid), sólamente con un 20 % de las 119 muestras confrontadas se obtuvieron valores considerados como muy críticos (un 12 % de las muestras ensayadas dieron de hechos valores no críticos). Así pues, incluso dentro de suelos calificados globalmente como de muy alta expansividad potencial, predominan estadísticamente los términos de moderada o incluso escasa expansividad. Se hace necesario, pues, en cada caso, un volumen de ensayos locales realmente representativo.

2. ANTECEDENTES

Los problemas cosntructivos derivados de la expansividad de los suelos pueden ser importantes, y afectan a gran número de países de nuestro planeta (GROMKO, 1974).

Aunque las implicaciones económicas son difíciles de cuantificar, es fácil concebir su importancia. JONES (1973) recoge una estimación de daños anuales atribuibles a suelos expansivos en EE.UU. que alcanzaban los 2.255 millones de dólares. Las medidas correctoras de daños por expansividad supusieron en Gran Bretaña en la década de los setenta un coste estimado en 250 millones de libras (DRISCOLL, 1984). Para España, AYALA (1975) señalaba, por comparación con datos de EE.UU., un coste mínimo de 1.000 millones de pesetas/año (Fot. 1 y 2).

El interés creciente por los problemas relacionados con los suelos expansivos queda reflejado en los últimos años en los numerosos trabajos de investigación y en las reuniones de carácter internacional centradas en ellos. Entre las más significativas de estas últimas hay que referirse a la *First International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils* (Texas, 1965), *Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils* (Texas, 1969), *Third International Conference on Expansive Soils* (Haifa, 1973), *4th International Conference on Expansive Soils* (Denver, 1980) y *Fifth International Conference on Expansive Soils* (Adelaide, 1984), y a la *Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction* (Denver, 1972). Entre los trabajos monográficos más destacados hay que señalar los preparados en EE.UU. por la Federal Highway Administration, que incluyen un Informe sobre la distribución de materiales expansivos en Estados Unidos (PATRICK y SNETHEN, 1976), basado



Foto N.º 1.—Daños típicos por expansividad reiterativos en Andalucía.



Foto N.º 2.—Ruina por expansividad de los vertisuelos (Cementerio de San José, Cañete de las Torres, Córdoba).

en características geológicas y climáticas, así como otras monografías dedicadas a los problemas de expansividad en carreteras y a la evaluación de la expansividad.

En España se viene investigando en los problemas de expansividad desde hace más de treinta años, en que el Profesor Jiménez Salas empezó a publicar sus primeros trabajos sobre el tema, habiendo continuado, posteriormente, él mismo y otros investigadores (Escario, Justo, Rodríguez Ortiz, Cuéllar, Oteo, etc) el estudio de los fenómenos de hinchamiento, el cálculo de cimentaciones, etc., con desarrollo de técnicas especiales originales para el análisis del comportamiento de los suelos arcillosos al cambiar su succión (ESCARIO y SAEZ, 1973).

Los factores que generalmente se analizan en todos estos trabajos incluyen los mecanismos implicados en la expansividad, ensayos de campo y laboratorio, métodos de predicción, tratamiento de suelos expansivos y diseño de estructuras.

Hay que añadir que el IV Simposio de la British Geotechnical Society (1983) estuvo centrado específicamente en la influencia de la vegetación en el comportamiento de los suelos expansivos, lo que pone de manifiesto el tratamiento monográfico que merecen algunos factores vinculados a la expansividad.

Hay que referirse, por último, a numerosas actuaciones concretas llevadas a cabo por distintas entidades españolas cuyas experiencias han sido tenidas en cuenta ahora para la realización cartográfica y para la redacción de la correspondiente Memoria.

3. EL FENOMENO DE EXPANSIVIDAD DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

3.1. Condiciones para la manifestación de la expansividad

Para que un suelo pueda exhibir expansividad son necesarios dos requisitos fundamentales:

— Deben existir, y entrar en funcionamiento, ciertos mecanismos que a nivel microescalar produzcan la inestabilidad volumétrica del suelo.

— Deben estar presentes unas fuerzas capaces de transferir la humedad de un punto a otro del suelo. Ello implica un desequilibrio de la humedad natural del entorno.

Estos requisitos pueden finalmente clasificarse en *intrínsecos* y *extrínsecos*. Los primeros son propios del suelo (composición mineralógica, textura y estructura) y establecen la capacidad expansiva teórica; los segundos vienen impuestos por factores externos (tales como la climatología, hidrogeología, vegetación y la pro-

pia actuación humana), y determinan que el potencial expansivo pueda o no desarrollarse.

Los procesos de inestabilidad volumétrica de los suelos han sido objeto de numerosos trabajos. No se trata de hacer aquí una revisión exhaustiva de las alternativas que determinan finalmente su expansividad, pero sí parece apropiado acceder a algunos conceptos que permitan centrar el objetivo primordial del trabajo, esto es, establecer cuándo se cumplen las condiciones para que un suelo sea o no potencialmente expansivo.

En el apartado bibliográfico se recogen algunos trabajos experimentales y de síntesis que desarrollan los conceptos que ahora se describen, en gran parte referidos a suelos españoles. Entre otros hay que reseñar los de ALPANES y CUELLAR (1972), CUELLAR (1978), GROMKO (1974), POUSADA (1984), RAVINA (1973), RODRIGUEZ ORTIZ (1975) y SNETHEN y col. (1977).

3.2. Mecanismos de expansión

Se definirán como expansivos aquellos suelos con capacidad para experimentar cambios de volumen cuando varía su humedad. La capacidad de adsorción/desorción de agua de los mismos depende finalmente del tipo y cantidad de mineral arcilloso.

Los procesos de hidratación o desecación de las arcillas pueden producirse externa o internamente a sus partículas constitutivas (Fig. 1).

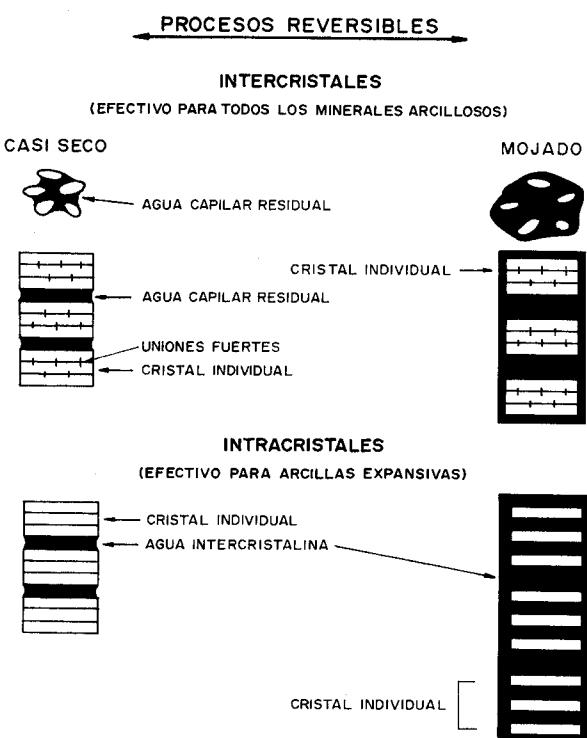


Fig. 1.—Naturaleza de los cambios de volumen por hidratación (Según Tourtelot, 1973).

Los cambios de volumen producidos por hidratación se verifican a nivel intercristalino en cualquier tipo de arcilla. Debido al escaso tamaño de los cristales (se admiten dimensiones inferiores a 2μ), las partículas se mantienen unidas bajo fuertes tensiones capilares. Estas tensiones disminuyen al ser humedecidas, con lo que el suelo puede hinchar.

A nivel intracristalino la hidratación tiene lugar sólamente en algunos minerales arcillosos. Los mecanismos que la producen están vinculados a su naturaleza cristalográfica. Debido a la sustitución, durante la etapa de formación del mineral, de algunos elementos de su red por iones de tamaño similar, pero de diferente carga eléctrica, las unidades estructurales no son eléctricamente neutras, sino que poseen una carga negativa. Esta carga se compensa mediante la adsorción de cationes externos a la red, que no siempre quedan íntimamente unidos a la estructura cristalina, sino que a veces son intercambiables.

Cuando las especies mineralógicas con cargas superficiales electronegativas entran en contacto con el agua, al ser éste un líquido polar, sus iones H^+ son fuertemente atraídos por las partículas de arcilla, y tienden a ocupar posiciones entre las láminas cristalográficas, separándolas para conseguirlo. El resultado es varias capas de moléculas de agua fuertemente adsorbidas (la llamada «doble capa»). Si existen cationes intercambiables, cada catión tiende a rodearse de dipolos de agua, con una energía de hidratación que depende de su radio iónico, mayor en los iones monovalentes. La consecuencia es también un aumento del espaciado laminar y, con ello, del hinchamiento.

En las primeras fases del proceso las moléculas de agua se disponen en capas alternativas, dentro del espacio intralaminar, pero al disminuir con la distancia las fuerzas eléctricas de superficie, los cationes comienzan a disponerse difusamente. Si, ya fuera del espacio intralaminar, existe disponibilidad de agua con una menor concentración iónica, se produce un flujo hacia aquél como consecuencia de la presión osmótica desarrollada, que tiende a equilibrar la concentración, produciendo con ello un hinchamiento suplementario. Los procesos se muestran esquematizados en la Fig. 2.

SNETHEN y col. (1977) señalan que las propiedades descritas, esto es, la atracción superficial de las partículas de arcilla, la hidratación de los cationes y la presión osmótica (esta última únicamente importante en condiciones de humedad y concentración iónica elevadas), constituyen los mecanismos fisiocoquímicos fundamentales que a nivel microescalar determinan el potencial expansivo de las arcillas. Todos juntos establecen la afinidad del suelo por el agua, que puede ser cuantificada determinando la succión, que pudiera definirse como el

déficit de la presión del agua existente en el suelo respecto a la atmosférica.

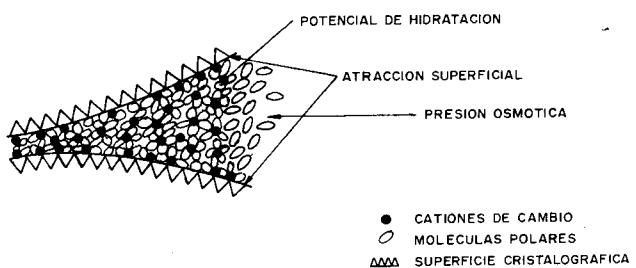


Fig. 2.—Fuerzas básicas que determinan el hinchamiento intralaminar de las arcillas.

3.3. Factores intrínsecos vinculados a la expansividad

La posibilidad de que un suelo tenga carácter expansivo depende primariamente del tipo de arcilla existente, puesto que no todos los minerales arcillosos pueden experimentar modificaciones volumétricas. Estas inestabilidades pueden ser especialmente importantes en las *arcillas esmécicas*, cuya especie más generalizada es la montmorillonita, y en la vermiculita. También se produce en los interestratificados de montmorillonita con clorita, illita y vermiculita. La haloysita tiene asimismo capacidad de hinchamiento, aunque mucho más limitada. Estas particularidades serán posteriormente analizadas.

Puesto que los suelos contienen normalmente, además de arcillas, minerales no arcillosos (tales como partículas granulares y precipitados químicos), la capacidad expansiva inherente a aquellas estará matizada por la presencia de estos últimos.

Existen, además, alternativas texturales (distribución de las partículas de arcilla, porosidad, orientación mineralógica, cementaciones, etc.) y estructurales (perfil estratigráfico, espesor del suelo, discontinuidades, etc.), que condicionan igualmente el potencial expansivo del suelo.

En definitiva, la capacidad expansiva del suelo depende no sólamente del tipo y cantidad de arcilla existente, sino de la naturaleza de la fracción no arcillosa, y de su fábrica. La incidencia de esos factores sobre su expansividad potencial será asimismo pormenorizada más adelante.

3.4. Factores extrínsecos vinculados a la expansividad

Determinan los cambios de humedad del terreno necesarios para que se manifieste el po-

tencial expansivo del suelo. Pueden establecerse dos grandes grupos:

- Cambios estacionales.
- Modificaciones de la humedad natural del terreno por la acción humana.

Los cambios estacionales están vinculados a las variaciones climáticas a lo largo del año. Las oscilaciones periódicas de humedad en una franja superficial de terreno (conocida a veces como «capa activa»), dependen de la relación precipitación/evaporación. Como la evaporación se realiza con frecuencia en gran medida a través de la actividad de la biomasa, se utiliza el término de **evapotranspiración**.

Si, en un período anual, la precipitación excede a la evapotranspiración, y se supera la capacidad de retención de agua intrínseca del terreno, se produce una eliminación por drenaje del exceso de agua. Este agua, si el suelo es permeable, puede dar lugar a un nivel freático. Las alternativas estacionales de humedad son, en estas condiciones, poco manifiestas. Esta misma circunstancia se produce si no existe apenas precipitación a lo largo del año.

Por el contrario, si las precipitaciones se concentran en determinadas estaciones, en los meses de sequía puede producirse una evapotranspiración no equilibrada por los aportes naturales de agua. Este déficit tiende a compensarse entonces a partir del agua retenida por el terreno. La humedad perdida tenderá a ser recuperada tras los períodos de lluvia. El resultado final son unos cambios estacionales de humedad en la franja más superficial del suelo.

La evapotranspiración depende, como se ha señalado, de la vegetación, que desarrolla una gran actividad vital precisamente en el comienzo de los meses secos, contribuyendo a la desecación del terreno. Otros factores que la condicionan son la humedad relativa del aire, su velocidad y la temperatura.

La profundidad afectada por los cambios estacionales depende estrechamente de las características hidrogeológicas del terreno, en gran medida relacionadas con su naturaleza estratigráfica.

Si existe un nivel freático próximo a la superficie, con una franja de terreno saturada y otra con agua capilar inmediatamente por encima, sus oscilaciones determinan cambios importantes de humedad en sus inmediaciones. Cuando no existe nivel freático, o éste es profundo (y además no vinculado normalmente a las variaciones estacionales), la profundidad afectada por esos cambios periódicos es reducida. En general se citan profundidades «activas» comprendidas entre 1,5 y 3 m. para las condiciones habituales en España.

Una manera de obtener información de esta profundidad puede ser abrir una calicata y comprobar hasta dónde progresó el deterioro del

terreno (además de si existe capa freática superficial). Esta observación no debe hacerse sobre cortes naturales, puesto que la perturbación habrá progresado también lateralmente, enmascarando el deterioro vertical.

Puntualmente, sin embargo, aun sin la presencia de un nivel freático próximo a la superficie, pueden darse circunstancias que profundicen la acción de los cambios estacionales. Hay que referirse en especial a la existencia de raíces arbóreas, y particularmente de plantas caducifolias, puesto que sus necesidades de agua se manifiestan también estacionalmente. Pueden ser muy peligrosos los llamados «árboles de sombra» (plátanos, álamos, acacias, sauces, etc.); por el contrario, el menor riesgo procedería de las coníferas (tales como pinos o cedros).

En resumen, las alternativas estacionales afectan a un espesor de suelo variable, pero en condiciones habituales, y si el suelo es compacto, no mayor de 2 ó 3 m. En suelos arcillosos flojos, o con componentes detriticos que le confieran una mayor permeabilidad, el espesor afectado por los cambios de humedad podría ser algo superior. La presencia de vegetación, y especialmente de raíces arbóreas, puede producir una zona desecada en su entorno que modifique el equilibrio secular del terreno, y que profundice incluso varios metros. Estas profundidades podrían también eventualmente alcanzarse por la presencia de un nivel freático sometido a fluctuaciones.

La implantación de una estructura conlleva una perturbación local de la humedad natural del suelo. En una primera fase, la excavación realizada permite acceder a cotas superficiales a terrenos que se encontraban con unas determinadas condiciones de humedad, motivando en muchas ocasiones su modificación temporal. Tras la ejecución de la obra se impide el acceso vertical de agua al terreno, y las pérdidas por evaporación. Esto crea un desequilibrio en relación a los terrenos circundantes, lo que puede determinar movimientos de humedad. Las transferencias están favorecidas, en climas cálidos, por el mayor calentamiento que experimentan las zonas colindantes a las construidas, que están protegidas de la insolación.

El resultado final puede ser una franja húmeda bajo la zona construida que determine el entumecimiento del suelo, o, alternativamente, el desarrollo de presiones. Estas inestabilidades pueden estar muy potenciadas si durante la realización de las obras se permitió una fuerte desecación del terreno.

En los movimientos laterales de humedad son, finalmente, determinantes las alternativas climáticas estacionales, puesto que bajo la zona construida tiende a mantenerse una humedad que aumenta o disminuye periódicamente en la capa activa de la periferia.

Hay que referirse, finalmente, a desecaciones accidentales del terreno producidas por con-

ducciones de calefacción y bulbos de desecación de calderas y hornos, que han sido origen de problemas al producirse una posterior hidratación del suelo.

4. GEOLOGIA DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS

4.1. Mineralogía

Las arcillas constituyen el último eslabón de la cadena de alteración de los silicatos, la familia mineralógica más abundante en la corteza terrestre (cerca del 90%). Integran las estructuras cristalinas silicatadas impuestas por las condiciones existentes en la atmósfera y la hidrosfera. Se trata, podría decirse, de nuestros minerales de la cotidianidad, pues continuamente se están formando y transformando.

Químicamente las arcillas son silicatos aluminicos hidratados. El aluminio puede estar parcialmente sustituido por magnesio o hierro, y

también poseen a veces elementos alcalinos y alcalinotérreos.

Los cristales de arcilla están estructuralmente constituidos por alternancias de capas tetraédricas (1 átomo de silicio centrado en 4 de oxígeno) y octaédricas (1 átomo de aluminio centrado en 6 de oxígeno). A veces el silicio forma también parte de los tetraedros, y el magnesio o el hierro de los octaedros, resultando un equilibrio eléctrico global.

La gran similitud entre la red cristalográfica de las capas tetraédricas y octaédricas permite que se combinen compartiendo átomos de oxígeno (en ocasiones sustituidos por grupos hidroxilos). La secuencia repetitiva de las capas determina el grupo de mineral arcilloso.

Por otra parte, existen a veces sustituciones en la red cristalina que, aunque introducen deformaciones, mantienen su forma (*sustituciones isomórficas*). Estas sustituciones, sin embargo, alteran el equilibrio eléctrico del cristal. Dentro de los grupos estructurales, el tipo y/o proporciones de la sustitución isomórfica es diferente para cada especie mineralógica.

TABLA I. CLASIFICACION SIMPLIFICADA
DE ARCILLAS TIPICAS

ESTRUCTURA (N.º capas tetraédricas/ N.º capas octaédricas)	GRUPO	SUSTITUCIONES ISOMORFAS	ESPECIES MINERALES
1:1	KANDITAS	AI POR SI (ESCASA)	CAOLINITA
		AI POR SI	HALOYSITA
	MICAS	AI POR SI	ILLITA
2:1	ESMECTITAS	AI POR SI (EN TET.) Mg POR AI (EN OCT.)	MONTMORILLONITA
		AI POR SI	BEIDILLITA
		Fe POR AI	NONTRONITA
		AI POR SI	SAPONITA
	VERMICULITAS	AI POR SI	VERMICULITA
2:2	CLORITAS	AI POR Si, Mg	CLORITA SEPIOLITA ATAPULGITA PALYGORSKITA
	CADENAS SIN ESTRUCTURA		

Las combinaciones entre las distintas posibilidades determinan el significativo número de especies mineralógicas existentes. La Tabla I clasifica las más típicas.

Algunas de las arcillas pueden combinarse en capas alternativas, dando origen a *interestratificados*. En ellos cada mineral conserva sus propiedades. Se presentan con cierta frecuencia interestratificados de montmorillonita con illita, clorita y vermiculita, interestratificados de illita con vermiculita y clorita e interestratificados de vermiculita y clorita.

Como se analizó anteriormente, la carga negativa introducida en la red cristalográfica de la arcilla por las sustituciones isomórficas tiende a ser compensada por la adsorción de cationes.

Estos cationes a veces no están fuertemente adsorbidos y pueden ser reemplazados. La capacidad de cambio depende de la especie mineralógica. Es mínima en la caolinita y alcanza valores máximos entre las esmectitas y la vermiculita.

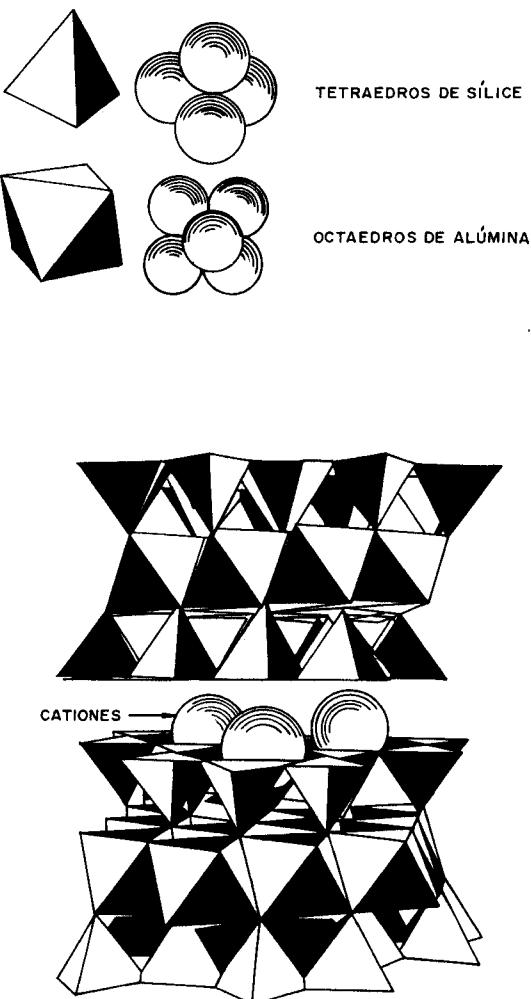


Fig. 3.—Estructura y modelo en capas de la montmorillonita con intervención de cationes intercambiables (según Low, 1973).

En estas arcillas de estructura laminar del tipo 2:1, la unión entre las unidades tricapa es débil, porque no se establecen enlaces químicos entre ellas (se admite que los enlaces son de tipo electrostático). Por ello, si los cationes compensadores de carga no están firmemente adsorbidos (como lo está el K en la illita), pueden ser más o menos fácilmente reemplazados. Los minerales arcillosos tricapa con capacidad de cambio son, pues, los típicos minerales expansivos.

El tipo de catión de cambio condiciona también la capacidad expansiva. Esta es máxima para el Li y Na, y mínima para el Ca y Mg. Según DIXON y col. (1977), las esmectitas saturadas en calcio hinchan desde 10 Å a un máximo de 20 Å, mientras que si el catión es sodio o litio hincharían teóricamente hasta el infinito.

De entre los minerales arcillosos tricapa con elevada capacidad para el cambio de cationes tiene el máximo interés, por su frecuente presencia en los suelos arcillosos, la montmorillonita. Su máximo potencial expansivo se desarrollará si el catión de cambio presente es el Na o el Li. (Fig. 3).

Además de la montmorillonita, tienen propiedades expansivas el resto de los minerales tricapa, excepto la illita, que, como sucede con los minerales micáceos, solamente manifestaría sensibilidad al agua en condiciones de extrema degradación.

La vermiculita tiene una capacidad expansiva algo menor que la montmorillonita en presencia de cationes de cambio divalentes. El potencial expansivo para cationes monovalentes es variable, similar al de la montmorillonita en el caso del Li, muy inferior si se trata de Na e inexistente para el K.

Entre los minerales de unidades estructurales dicapa, se considera que la halloysita tiene también propiedades expansivas. Esta característica se atribuye a que las uniones intracrystallinas se establecen no directamente, sino a través de una capa de moléculas de agua, lo que las debilita.

GRIM (1962), resume los valores típicos de hinchamiento para algunos minerales arcillosos:

Mineral de arcilla	% Hinchamiento libre
Montmorillonita-Na	1.400 a 2.000
Montmorillonita-Ca	45 a 145
Vermiculita	Variable
Clorita	Variable
Illita	60 a 120
Caolinita	6 a 60

Finalmente hay que consignar que, en las secuencias de interestratificación, la capacidad expansiva depende del tipo y frecuencia de mineral hinchable. Los interestratificados montmorillonita/vermiculita serían los de mayor potencial de expansión.

4.2. Génesis

La Fig. 4 resume los procesos naturales que conducen a la formación de rocas arcillosas.

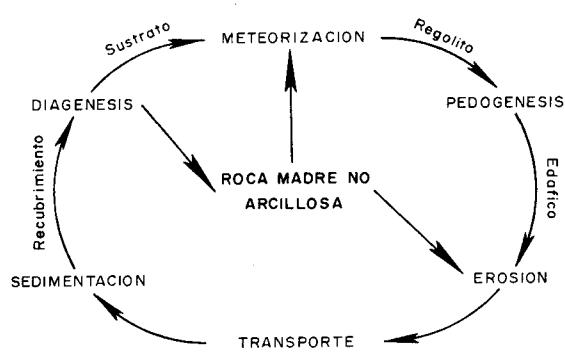


Fig. 4.—Ciclo de los suelos arcillosos (Procesos y tipos de suelos).

Hasta la consolidación del sedimento, la arcilla puede formar parte de un regolito (roca alterada), suelo edáfico o de un material flojo transportado (Fig. 5). El ciclo se completa por procesos *diagenéticos*, *metasomáticos* o *metamórficos*, que transforman completamente la litología. Eventualmente, sin embargo, el sedimento consolidado o la roca todavía arcillosa pueden acceder a los agentes meteóricos y recomenzar el ciclo.

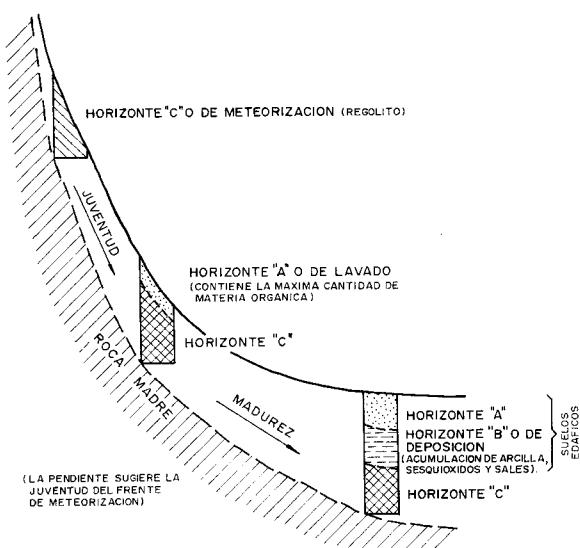


Fig. 5.—Formación y evolución de suelos residuales.

Los minerales arcillosos se forman en un suelo residual o en un sedimento por transformación de minerales previos o por neoformación a partir de iones allí existentes. Si el suelo experimenta un transporte posterior y se incorpora, con otros materiales, al sedimento, éste contiene minerales arcillosos heredados.

Las arcillas proceden, pues, en último término, de la *meteorización* de las rocas ígneas (granitos, etc.). Los agentes de alteración meteórica comprenden *mecanismos físicos* (acción hielo/deshielo, temperatura, hidratación, efectos de cristalización de sales), y *mecanismos químicos* (disolución, oxidación/reducción, hidrólisis). Los mecanismos físicos producen una disgregación de la roca, favoreciendo la acción de los mecanismos químicos, que conducen a su transformación.

Las características medioambientales determinan las condiciones de meteorización, junto a la naturaleza de la roca. Los procesos biológicos completan el proceso.

El mecanismo fundamental de alteración es la *hidrólisis*, descomposición por el agua de los minerales silicatados, que incorpora los elementos de los cristales a las soluciones.

En condiciones climáticas templadas, los minerales arcillosos de neoformación primaria serían la illita (a partir de los silicatos calcoalcalinos) y la clorita (a partir de los silicatos ferromagnesianos).

Posteriormente pueden producirse cambios geoquímicos que determinen una degradación (por pérdida de iones de la estructura cristalina) a vermiculita, interestratificados y, eventualmente, en suelos con mal drenaje que luego pueden ser retrasportados, a montmorillonita. Durante el transporte la moscovita se hidrata, pierde K, y se transforma en illita. La formación de caolinita requiere una intensa meteorización química, propia de climas tropicales, o una acción hidrotermal.

Así pues, la composición final del material desarrollado «*in situ*», o en tránsito de ser transportado, depende tanto de los materiales preexistentes como de las condiciones de meteorización y evacuación.

Los iones liberados en la alteración, junto a minerales en desigual estado de transformación y a arcillas heredadas, llegan finalmente al sedimento.

Las moléculas de $\text{Si}(\text{OH})_4$ existentes en la solución se polimerizan en presencia de cationes metálicos dando una capa tetraédrica con estructura regular. Es decir, se produce una fijación de los tetraedros de sílice sobre las capas de hidróxido, cuya velocidad de formación condiciona la velocidad de génesis de los minerales arcillosos. Así pues, de acuerdo con Siffert, se puede considerar a las arcillas como sales básicas cuyo anión (distinto a los OH^-) consti-

tuye la capa tetraédrica, y cuyo catión (más los oxígenos) integra la octaédrica.

El tipo de arcilla formada depende tanto de la naturaleza de la roca de procedencia como de la climatología y de las condiciones de drenaje. La Fig. 6 muestra cuál sería la distribución ideal de los minerales arcillosos neoformados en función del clima.

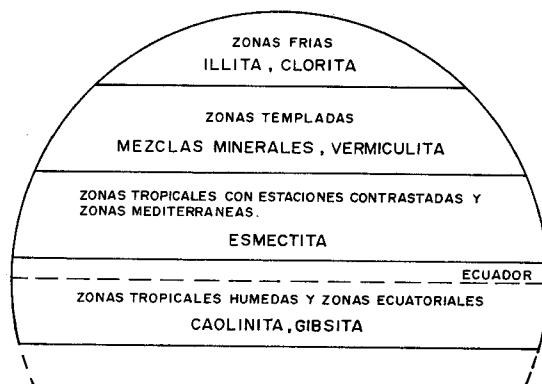


Fig. 6.—Distribución ideal de los materiales arcillosos en función del clima (según Millot, 1979).

Cuando el medio geoquímico es alcalino, con escasas lluvias y drenaje pobre (regiones semiáridas de topografía uniforme), se generan arcillas esmectíticas si existe en las aguas de hidrólisis sílice y cationes divalentes, lo que depende de la naturaleza de la roca madre.

En efecto, las esmectitas (como las palygorskitas) requieren para su formación medios geoquímicos ricos en iones, en general con pH 7,5 a 8, en paragénesis con carbonatos y en presencia de SiO_2 , Al y Mg.

TOURTELOT (1973) resume de la siguiente manera las condiciones de formación de la montmorillonita:

Desintegración: Extrema.

Hidratación: Fuerte.

Lavado: Restringido (Mg, Ca y Fe, retenidos en el medio).

Oxidación-Reducción: Variable.

Acidez-Alcalinidad: Alcalina.

Fuentes minerales: Amplio rango de silicoaluminatos, incluyendo otros minerales arcillosos. Son muy favorables los silicatos reactivos, tales como los vidrios volcánicos.

Estas condiciones son contrarias a la formación de caolinita, que requiere abundantes lluvias y buen drenaje, lo que determina pH ácidos en el suelo. Se produce así una significativa movilización de cationes, que no quedan disponibles para la fijación de la sílice.

La illita puede formarse y es estable en medios geoquímicos muy diversos, pero con frecuencia próximos a los de las esmectitas, siempre que exista K disponible. De hecho este mi-

neral es, con gran diferencia, estadísticamente el más abundante entre los arcillosos (se citan porcentajes superiores al 60%).

Las bentonitas, cuyo nombre procede del topónimo Fort Benton, Wyoming (U.S.A.), son arcillas constituidas esencialmente por montmorillonita, y fueron descritas por primera vez por Kight en 1898. Aunque en su origen designaban arcillas procedentes de la alteración de cenizas volcánicas, hoy es frecuente llamar bentonitas a las arcillas de plasticidad muy elevada. Se trata, igualmente, de arcillas montmorilloníticas, aunque el nombre no resulta con frecuencia genéticamente correcto.

La interacción de agua salada en medios sedimentarios de transición (como estuarios) o marinos crea unas condiciones específicas. Se han observado transformaciones de esmectitas heredadas en illita y clorita (BOWLES, 1978). Sin embargo, los sedimentos arcillosos marinos están muy vinculados al medio continental de procedencia. Como *procesos autigénicos* (desarrollados «in situ») peculiares hay que referirse a alteraciones de productos volcánicos, que conducen a la formación de genuinas bentonitas.

El material sedimentario transportado y depositado puede experimentar una doble evolución. Por una parte puede quedar cubierto por sucesivos aportes de sedimentos, consolidándose y pudiendo desarrollar procesos diagenéticos; el resultado final sería una *litificación* del sedimento (con eventual formación de esquistos arcillosos). Por otra parte, en sus capas superiores (al igual que en la roca madre) pueden producirse *procesos pedológicos* si el sedimento queda sometido a alternativas edáficas, que a veces quedan incorporadas al perfil estratigráfico como *suelos relictos*. Estas secuencias edáficas son frecuentes en materiales depositados en cuencas someras.

Los sucesivos procesos diagenéticos conducen a una reorganización de los minerales arcillosos de baja cristalinidad, como son las esmectitas, transformándolas en cloritas e illitas.

En los procesos de ámbito edáfico, de acuerdo con MILLOT (1964), aparece de una manera sistemática y abundante montmorillonita cuando existe hidrólisis pero el drenaje es lo suficientemente débil para que las soluciones se encharquen mientras que la evaporación las concentra. Además de montmorillonita neoformada, se producen transformaciones por agrandación de arcillas heredadas (adquisición de iones por la estructura cristalina), que conducen igualmente a la formación de montmorillonita.

Estas situaciones se producen en los suelos isohúmicos (muy vinculados a la vegetación) y, sobre todo, en los *vertisuelos* (DUCHAUFOUR, 1977). Este último tipo de suelos son de evolu-

ción rápida, con un perfil homogéneo relativamente profundo de hasta poco más de 1 m. de profundidad (Fig. 7). Son propios de climas cálidos con estación seca, y se desarrollan en medios confinados que permitan la acumulación de las soluciones cargadas de iones movilizados en épocas de lluvia. El ejemplo típico son los *suelos negros tropicales*, entre los que se incluyen las «tierras de bujeo» andaluzas (Fot. 3).

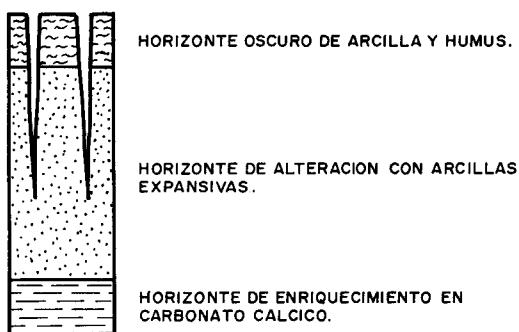


Fig. 7.—Perfil de un vertisuelo típico.

4.3. Facies

Las arcillas no están constituidas normalmente por una única especie mineralógica, ni aparecen en general solas, sino que se encuentran junto a materiales no arcillosos en proporciones muy variables.

El nombre de arcilla, aplicado con frecuencia indiscriminadamente a las litologías arcillosas, suele ser excesivo. En realidad las llamadas «arcillas» no suelen tener un predominio cuantitativo de minerales arcillosos; una gran parte corresponde a minerales integrados en la fracción limosa y a precipitados químicos (Fig. 8). Ciertamente se trata de un término tan aceptado que resulta difícil de evitar. Parecería más apropiado, sin embargo, utilizar el de *pélitas*

(criterio granulométrico y no de composición). Para el sedimento litificado se ha propuesto en ocasiones el nombre de *lutita*.

Los componentes no arcillosos incluyen, principalmente, partículas de cuarzo (a veces de sílice neoformada), feldespatos, carbonatos (heredados o neoformados), micas y otros minerales primarios más o menos transformados, minerales autógenos de hierro y de aluminio (goethita, hematites, limonita, gibbsita, etc.), impregnaciones de sales diversas (férreas, calcáreas, magnésicas, etc.) y materia orgánica.

El aspecto del suelo depende en gran parte de la naturaleza del material no arcilloso. El color se relaciona con el de los precipitados e impregnaciones. Así, la presencia de materia orgánica da al suelo colores gris oscuros. Como las arcillas esmectíticas se constituyen con frecuencia en condiciones geoquímicas reductoras, tienen normalmente colores gris azulado o verdoso, debido al estado poco oxidado de los minerales de hierro. No se trata de una regla general, puesto que también pueden presentar tonalidades marrones, aunque al menos en algunos casos son de origen posterior.

La montmorillonita es, estadísticamente, propia de medios lagunares someros en climas cálidos («playas»). Ello indica unas condiciones de drenaje impedido en aguas estacionales sometidas a fuerte evaporación. La elevada concentración iónica conduce no solamente a la neoformación de esmectitas, sino frecuentemente a la precipitación de sales diversas. Son frecuentes las de tipo cálcico (en general carbonatos, a veces sulfatos) y las ferrosas. Eventualmente se desarrollan segregaciones silíceas. A veces puede existir materia orgánica, procedente de una vegetación palustre. Los minerales heredados incluyen, además de arcillas, partículas de tamaño limo, predominantemente de naturaleza cuarzosa, a veces feldespática, micas y minerales primarios estables mecánica y químicamente (rutilo, zircón, turmalina, etcétera).

La estructura de los sedimentos es con frecuencia laminar, en bancos o tablas, según sea su espesor. Lateralmente se acuñan o cambian de naturaleza. En el entorno de las corrientes de afluencia los estratos son lenticulares y entrecruzados. El perfil sedimentario puede estar muy vinculado a las alternativas meteorológicas, sean de carácter secular o estacional, que son las que establecen el secuenciado rítmico que con frecuencia tienen los estratos depositados en medios lagunares someros.

Estas alternativas se reflejan en el contenido en arcilla de los estratos. Las avenidas en épocas de lluvias determinan un aporte de material más grueso, que puede ser una arena limosa, pero en el que suelen encontrarse arcillas. La alimentación se produce en un corto período de tiempo, sin que exista apenas floculación; en estas condiciones, las arcillas tienden a disem-

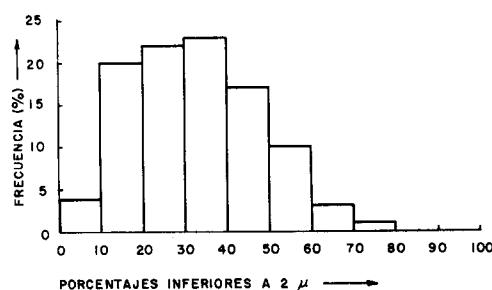


Fig. 8.—Distribución del porcentaje de partículas inferiores a 2 μ en suelos arcillosos españoles.

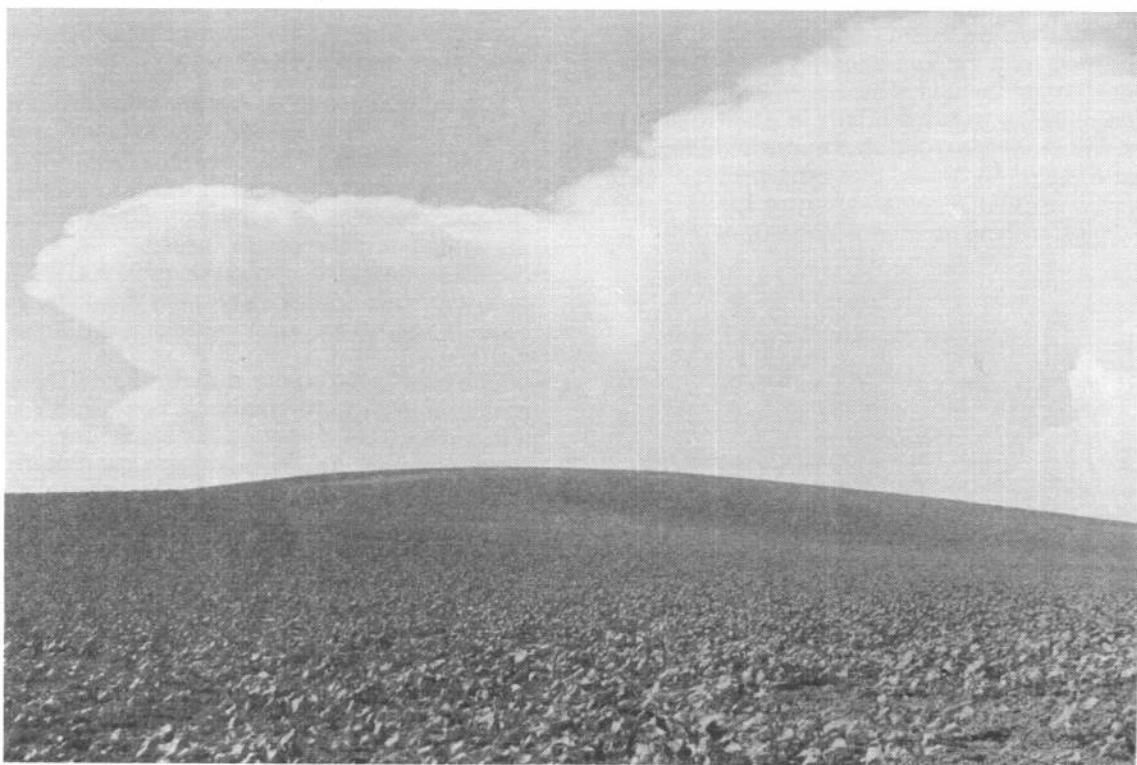


Foto N.º 3.—Paisajes alomados al Sur del río Guadalquivir con condiciones litológicas y mortoclimáticas generadoras de suelos expansivos.



Foto N.º 4.—Microrrelieve mamelar por movimientos verticales del suelo.

narse en los materiales no arcillosos. Por el contrario, en condiciones de aporte limitado, los materiales son más finos y se depositan mucho más secuencialmente. Si el período de sequía es largo y el aporte hídrico se limita a encarcamientos y a ocasionales flujos de barro, adquieren gran importancia los procesos de autigénesis, que incorporan arcillas de neoformación y sales a un sedimento ya en su origen muy arcilloso.

El resultado final puede ser un perfil del suelo donde se interestratifican episodios muy arcillosos con otros donde predominan los componentes detriticos.

Por otra parte, en el sedimento pueden desarrollarse horizontes edáficos superficiales que luego se incorporan a la secuencia estratigráfica cuando son sepultados por nuevos aportes de sedimentos. Estos paleosuelos se reconocen frecuentemente por la existencia de depósitos de carbonatos, niveles ferruginosos o tramos orgánicos. Puede existir, además, una gradación de color en la matriz del suelo.

Este tipo de facies sedimentaria descrita se repite en España con frecuencia en las cuencas terciarias interiores (Mesetas y Valle del Ebro).

Sedimentos con esmectitas pueden también encontrarse en medios marinos, sea como arcillas heredadas del medio continental o transformadas. A partir de arcillas illíticas se generan interestratificados por pérdida de potasio; en las montmorillonitas heredadas, el catión de cambio cárlico es reemplazado por el magnésico (WEAVER, 1978). En todos los casos las arcillas están fuertemente floculadas.

En el epígrafe anterior se describieron las montmorillonitas producidas a partir de materiales volcánicos y las de procedencia edáfica. Estas últimas son incorporadas, eventualmente, a los depósitos eólicos, fluviales o lagunares.

4.4. Textura

La disposición de los minerales arcillosos dentro de una formación litológica (*textura o fábrica del suelo*), depende de las características de medio sedimentológico y de los procesos post-sedimentarios.

La naturaleza del medio de deposición se refleja en la textura del sedimento, además de en su estructura. Cambios progresivos de las condiciones energéticas conducen a variaciones que se definen como cambios de facies; modificaciones bruscas (generalmente impuestas por la morfología de la cuenca), determinan engrosamientos y agotamientos de los estratos.

Los estratos con minerales de neoformación progresan mucho más lentamente que los constituidos por aportes detriticos. Los minerales arcillosos pueden agruparse en dominios y gru-

pos con continuidad espacial; en el caso de medios físicos dominados por corrientes, las arcillas se diseminan con otros materiales detriticos, resultando una textura mineralógicamente más discontinua. Los propios minerales arcillosos pueden tener microtexturas dispersas o *floculadas*, que conllevan o no una orientación de las partículas al nivel de los dominios (Fig. 9).

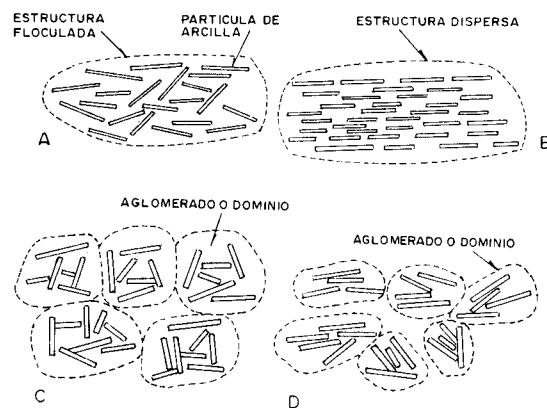


Fig. 9.—Microestructuras de las arcillas (tomado de Poussa, 1984).

Estas características texturales del suelo inciden significativamente en su capacidad expansiva. La mayor actividad se desarrollaría para arcillas floculadas en suelos texturalmente continuos, propios de medios sedimentológicos poco dinámicos con concentraciones salinas elevadas.

En el caso de los suelos edáficos, los procesos pedológicos pueden diferenciar horizontes de concentración de determinados componentes y lavado de otros. En los vertisuelos, sin embargo, existen movimientos verticales del suelo producidos por los ciclos de humectación/desecación de las arcillas expansivas. Estos procesos de inversión conducen a una homogenización de la franja más superficial del terreno, además de a abombamientos superficiales (Fot. 4). El proceso está esquematizado en la Fig. 10, resumido de LYTTON (1973) y DUCHAUFOUR (1977).

Durante los procesos pedológicos o sinsedimentarios (coetáneos a la sedimentación), el suelo o sedimento puede impregnarse de sales que dan una coherencia textural a la formación litológica. No obstante, la verdadera reorganización textural y mineralógica se produce a medida que los depósitos quedan enterrados bajo nuevas capas de sedimentos.

Los procesos que conducen a la litificación del material se denominan *diagenéticos*, y se desarrollan en fases sucesivas. Pueden eventualmente concluir, si se alcanzan suficientes espesores (cientos de metros), en esquistos ar-

cillosos, que a su vez podrían dar origen, ya en condiciones metamórficas, a rocas no arcillosas.

La diagénesis, en sus primeras etapas, lleva principalmente los siguientes procesos:

a) **Compactación.** Su consecuencia principal es la disminución de la porosidad del suelo o sedimento (consolidación). En depósitos arcillosos una porosidad originaria del orden del 80% puede pasar a otra del 30% con una sobrecarga equivalente a 100 Kp/cm².

Los factores esenciales que condicionan el cambio de porosidad son la presión de carga, el tamaño de grano y la composición mineralógica de la arcilla.

Según datos de Meade (1968), recogidos por RIEKE y CHILINGARIAN, el grado de compactación es máximo para las arcillas coloidales, dentro de éstas para las montmorilloníticas, y dentro de ellas para las sódicas.

Durante la compactación se expulsa agua del sedimento, y este agua puede arrastrar componentes en disolución que precipiten en otro lugar. La compactación también determina, entonces, una cierta redistribución mineralógica.

b) **Cementación.** Se produce por precipitación de materiales en los intersticios del sedimento. Los más frecuentes serían calcita, dolomita, óxidos de hierro y ópalo o calcedonia.

Independientemente, la compactación produce un incremento local de presión entre los granos. Ello puede provocar una disolución puntual del grano y una migración hacia sus bordes en contacto con poros, donde al disminuir la presión la solución puede precipitar. El resultado es un recrecimiento de los granos, que pueden terminar uniéndose unos con otros.

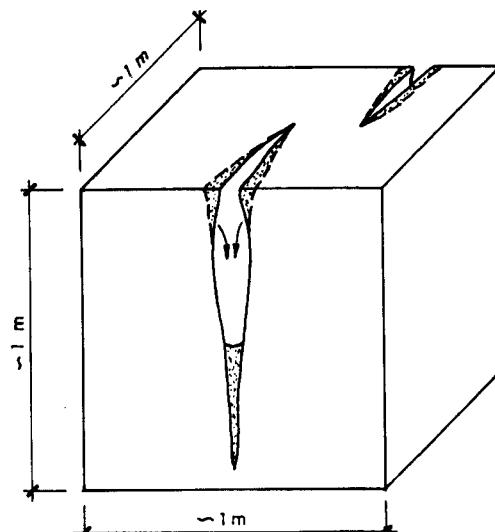
Estas interpenetraciones pueden ser mixtas, por ejemplo entre partículas de arcilla y gránulos de cuarzo.

c) **Neoformación y reorganización de minerales.** La diagénesis produce cambios mineralógicos muy significativos en las arcillas. La montmorillonita se transforma en illita (en medios ricos en K) o clorita (medios ricos en Mg), a veces con interestratificados intermedios.

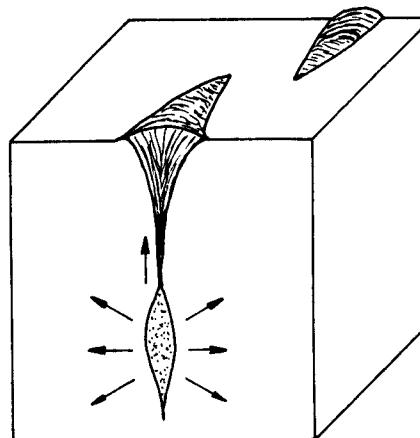
La reorganización mineralógica tiene como resultado, en las primeras etapas, una homogeneización textural del sedimento consolidado (lutita). A veces se produce una reordenación de las partículas, que introduce una anisotropía textural en el suelo (argilita), y que en fases diagénéticas avanzadas puede dar origen a estructuras esquistosas (esquistos arcillosos).

El sedimento que ha experimentado transformaciones diagénéticas tiene unas características que se simplifican señalando que está «litificado». Este término significa que se trata de un material compacto y de una significativa resistencia mecánica en condiciones naturales.

Tales características se reflejan en su capacidad expansiva. Aunque subsisten arcillas expansivas, la posibilidad de acceder a los cambios de humedad es más reducida; al mismo tiempo, los enlaces diagénéticos pueden impedir que el hinchamiento se manifieste. Es por esto que los ensayos de expansividad con muestras remoldeadas, en que son eliminados aquellos enlaces, tienden a sobrevalorar el potencial expansivo de los suelos consolidados.



ESTACION SECA: AGRIETAMIENTO Y CAIDA DE ARCILLA



ESTACION HUMEDA: CIERRE DE GRIETAS Y EMPUJE DE LA ARCILLA BLANDA HINCHADA

Fig. 10.—Mecanismo de inversión vertical del suelo.

4.5. Historia geológica

La historia geológica del sedimento o suelo sintetiza, de alguna manera, el alcance de los procesos postsedimentarios; esto es, la importancia de las transformaciones diagenéticas (y, eventualmente, metamórficas). Intuitivamente se comprende que, cuanto más antiguo sea el sedimento, mayores serán las posibilidades de haber experimentado cambios importantes.

Se ha hecho referencia anteriormente a que las arcillas no son materiales primigenios, puesto que para su formación generalizada se requiere la existencia de procesos vinculados a la atmósfera y a la hidrosfera. Por otra parte, la dinámica terrestre introduce mecanismos térmicos y tensionales que modifican el campo de estabilidad de los minerales arcillosos eventualmente constituidos a lo largo de las eras geológicas, y que conducen por último a nuevos minerales no arcillosos.

El resultado final es que el porcentaje de arcillas en las rocas decrece, global y estadísticamente, con su antigüedad. De hecho, se habla de la «España arcillosa» para referirse a las Mesetas y Valle del Ebro, zonas geológicamente jóvenes del Mioceno (Terciario Superior).

Al mismo tiempo, y dentro de los minerales arcillosos, las esmectitas constituyen un grupo mineralógico muy sensible a las modificaciones diagenéticas. Se comprende que, asimismo de una forma global, el porcentaje de minerales esmectíticos dentro de las formaciones sedimentarias disminuya igualmente con su edad.

Estos criterios son, por supuesto, generales y con excepciones. Así, como se verá más adelante, los facies triásicas españolas, muy arcillosas en sus pisos superiores (*facies Keuper*), conservan arcillas montmorilloníticas a veces en proporciones importantes.

Sin embargo, como primera aproximación, los sedimentos coetáneos (de una misma antigüedad geológica) habrán estado en conjunto sometidos a unas condiciones postsedimentarias relacionables.

Este razonamiento es aplicable, sobre todo, a la historia tensional de la formación estratigráfica. La redefinición textural y el eventual desarrollo de pliegues y fracturas conlleva una anisotropía estructural que debe reflejarse en su comportamiento mecánico.

Finalmente, las condiciones paleoambientales de las cuencas de sedimentación coincidentes en el tiempo, tendrán también unas concordanacias para un entorno geográfico próximo que quedarán reflejadas en unas facies litológicas similares.

La conclusión es que es posible relacionar algunas características intrínsecas de las formaciones sedimentarias de una antigüedad geológica equiparable, especialmente las de tipo es-

tructural, y representa, por tanto, un dato más a tener en cuenta en la valoración de su capacidad expansiva global.

4.6. Geomorfología

Las arcillas expansivas tienen unas peculiaridades morfológicas y organolépticas que pueden ser apreciadas con frecuencia, directa o indirectamente.

Dentro de una zona climática determinada, la posición morfológica del terreno, junto a la naturaleza del sustrato (y puntualmente la vegetación), deciden las características edáficas del suelo.

Los vertisuelos se desarrollan en valladas, fondos y plataformas de escasa pendiente, que permitan la acumulación transitoria de agua. La climatología ha de ser cálida, con déficit anual de humedad; el sustrato, rico en cationes. Sobre los vertisuelos las alternativas estacionales pueden originar profundas grietas (Fig. 11) y un microrrelieve («bujeo» o «buhedo») que se renueva a cada ciclo. Su origen se ha analizado en el epígrafe anterior.

A estos movimientos se une, si existe una cierta pendiente, un desplazamiento gravitacional del suelo por *reptación* (proceso, por otra parte, propio de todos los suelos arcillosos, pero más exagerado si existen arcillas expansivas).

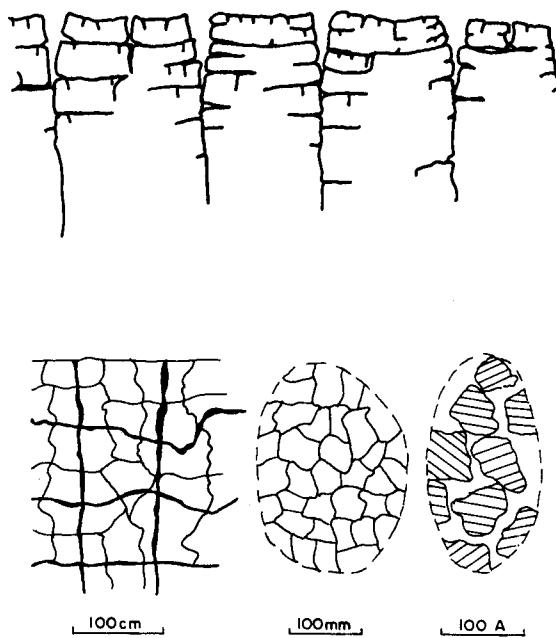


Fig. 11.—Alteraciones estructurales típicas de los suelos expansivos (Jiménez Salas, 1965; Pousada, 1984).

La presencia en el terreno de arcillas expansivas, generalmente muy plásticas, se manifiesta por la «pesadez» del suelo cuando está mojado. Se adhiere a los objetos y se deforma con facilidad al paso de personas y vehículos. Las deformaciones permanecen cuando el suelo pierde humedad y son difíciles de destruir manualmente. En la estación seca pueden desarrollarse anchas y profundas grietas, a veces de labios muy desiguales (Fot. 5). Rompiendo un trozo de suelo se obtienen fragmentos de bordes cortantes y, si la textura del mismo es compacta, las caras son satinadas. Los bloques extraídos del subsuelo se cuartelean profusamente al permanecer en contacto con el aire (Fot. 6).

Los desmontes aparecen con frecuencia muy degradados, con caída de arcilla mezclada con terrones y trozos centimétricos del suelo (Fot. 7). En su franja más superficial se desarrollan estructuras prismáticas con juntas horizontales,

que tienden a despegarse de la pared del terreno.

Los colores son gris oscuros si se trata vertisuelos típicos y variables pero con frecuencia gris verdoso o azulado en el sustrato.

La escasa capacidad drenante que tienen en general los suelos arcillosos expansivos impide o menoscaba el crecimiento espontáneo de especies arbóreas freatófilas, puesto que estos vegetales precisan de suelos aireados y que sean capaces de suministrar elevadas cantidades de agua. La vegetación espontánea suele ser xerófila y de escaso porte, en correspondencia con unas condiciones climáticas que son concomitantes con la propia génesis del suelo.

La Tabla II resume las peculiaridades descritas, que pueden indicar la presencia de arcillas expansivas en el terreno.



Foto N.º 5.—Limos arcillosos aluviales de carácter montmorillonítico.



Foto N.º 6.—Limos arcillosos miocenos del Sur de Madrid.
(L.L.: 129,2; I.P.: 38,1; Índice de Lambe: 6,9 Kp/cm²).



Foto N.º 7.—Desmonte en estratos arcillosos expansivos
mostrando el deterioro a los pocos meses de su excavación
(Rivas de Vaciamadrid).

TABLA II

RECONOCIMIENTO DE CAMPO DE ARCILLAS EXPANSIVAS

- a) Ausencia en general de vegetación freatófila espontánea (árboles y arbustos de hoja caduca).
- b) Colores primarios del suelo grises, verdosos o azulados.
- c) Durante la estación seca, grietas poligonales anchas y profundas en la superficie del terreno, a veces de labios muy desiguales.
- d) El suelo humedecido es muy moldeable y mancha los dedos.
- e) Barro pegajoso que se adhiere fuertemente al calzado y a la maquinaria.
- f) Los terrones de suelo y las deformaciones producidas en el terreno mojado (huellas de pisadas, roderas de vehículos, etc.) son muy persistentes.
- g) Los suelos en estado seco son difíciles de romper con instrumentos manuales, y de trocear con las manos.
- h) Los suelos de textura masiva dan al romper superficies curvas y satinadas de bordes cortantes.
- i) Los cortes efectuados en el suelo húmedo adquieren al secarse el aspecto de las superficies de rotura producidas en estado seco.
- j) Los bloques de sustrato dejados secar tienden a cuartearse profusamente.
- k) Los desmontes están muy degradados, con disyunciones prismáticas superficiales y con caída de pequeños bloques y terrones de arcilla al pie del talud.
- l) En los vertisuelos puede desarrollarse un microrrelieve característico (bujeo).

4.7. Incidencia de la composición y textura en la expansividad

Como se ha ido adelantando en epígrafes anteriores, el tipo de mineral arcilloso, su distribución y porcentaje, y la textura del suelo, establecen su capacidad expansiva intríseca. Estos factores pueden ser resumidos como sigue:

Composición: Tipo de arcilla. Porcentaje. Tipo de catión de cambio.

Textura: Granulometría. Orientación. Diseminación. Compacidad. Enlaces diagenéticos. Cementaciones.

La mayor parte de los problemas constructivos causados por la expansividad del terreno se producen, estadísticamente, en suelos montmorilloníticos. Se ha visto con anterioridad que, dentro de las variaciones inherentes al catión de cambio, las montmorillonitas sódicas tienen la máxima capacidad de hinchamiento (sin embargo, las más frecuentes son de tipo cárlico).

La influencia del contenido en arcilla sobre la expansividad del suelo ha sido expresada por SEED y col. (1962) mediante la ecuación:

$$S = K \cdot C^{3.44}$$

donde S refleja el potencial expansivo, C es la fracción inferior a $2\text{ }\mu$, y K un parámetro que depende del tipo de arcilla.

Para EL-SOHBY y RABBA (1981) es el porcentaje de arcilla activa el factor más importante en el hinchamiento del suelo. Estos mismos autores llegan, por otra parte, a la conclusión de que cuanto menor es el tamaño de las partículas de la fracción gruesa, mayor es el potencial expansivo.

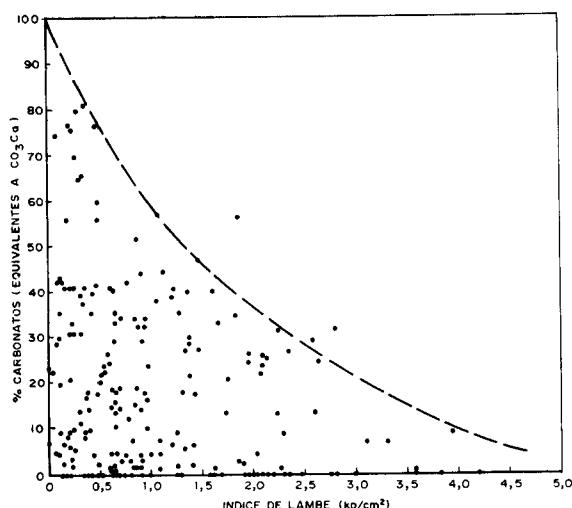


Fig. 12.—Capacidad de hinchamiento en el ensayo de Lambe de suelos arcillosos carbonatados.

Sobre la importancia que la naturaleza de la fracción no arcillosa ejerce en la expansividad global no se han encontrado en la bibliografía referencias pormenorizadas, aunque esa influencia se considera muy significativa.

La Fig. 12 recoge la distribución de los valores de hinchamiento, establecidos por el ensayo Lambe (uno de los ensayos de cuantificación de la expansividad descrito en el capítulo siguiente), de 200 suelos carbonatados. A la vista de los resultados obtenidos es evidente que el contenido en carbonatos no es determinante de la potencialidad expansiva del suelo, pero sí que incide en su capacidad máxima el hinchamiento. Este efecto no debe ser debido únicamente a la menor proporción de arcilla correlativa al incremento del contenido no arcilloso, puesto que no se ha encontrado una valoración similar si el porcentaje de la fracción no arcillosa se evalúa granulométricamente. De alguna manera, pues, las sales cárnicas inhiben el potencial expansivo de los minerales de la arcilla.

Entre los factores texturales con incidencia en la capacidad expansiva del suelo, hay que referirse a la anisotropía de comportamiento introducida por una orientación mineralógica preferencial. Las propias partículas arcillosas adoptan, durante su formación, posiciones diferentes si se ha producido o no floculación.

Al mismo tiempo, los minerales arcillosos pueden encontrarse distribuidos en el suelo de forma *diseminada* o *aglomerada*. A grandes rasgos, en el primer caso las partículas de arcilla se distribuyen más o menos aleatoriamente en una matriz no arcillosa; en el segundo caso existen cúmulos (o supradominios) constituidos básicamente por minerales arcillosos. En los vertisuelos se producen, como consecuencia de los movimientos verticales, segregaciones grumulares de arcilla.

Las últimas formaciones descritas son propias de medios autigénicos (es decir, no detriticos) que, texturalmente, conducen a mayores riesgos de expansividad del suelo.

Se ha señalado anteriormente que los procesos diagenéticos modifican las características texturales de la formación litológica. Por una parte pueden precipitar un cemento y, por otra, favorecer el desarrollo de enlaces entre partículas, como consecuencia de la compactación. La compactación, además, reduce la permeabilidad del sedimento y, con ello, la facilidad del suelo para acceder eventualmente a los cambios de humedad.

La *cementación* reduce las posibilidades expansivas del material, puesto que los desplazamientos de las partículas estarán impedidos o dificultados. Al mismo tiempo, las láminas de arcilla pueden quedar revestidas y no tener acceso directo al agua.

En los suelos remoldeados se alteran las características texturales del material, por lo que generalmente manifiestan una mayor capacidad expansiva.

5. IDENTIFICACION GEOTECNICA DE SUELOS EXPANSIVOS

5.1. Métodos de valoración de la expansividad

La bibliografía recoge un amplio número de índices y ensayos para definir y/o evaluar la capacidad expansiva de un suelo. Las propuestas abarcan desde meros índices mineralógicos que advierten de su expansividad potencial hasta medidas de succión realizadas «in situ». Se han puesto a punto, igualmente, numerosos ensayos de laboratorio que reflejan o miden, cualitativa o cuantitativamente, la expansividad del suelo. Los trabajos de síntesis de CUELLAR (1978), POUSADA (1984) y SNETHEN (1984)

proporcionan una amplia visión del alcance de estos índices y ensayos.

Existen dos amplias alternativas para la identificación y evaluación de suelos expansivos:

— **Técnicas indirectas:** Recurren a la identificación mineralógica o de parámetros vinculados directamente a la composición, textura y comportamiento del suelo, contrastados por la experiencia en el comportamiento de suelos semejantes. Se utilizan normalmente complementándose.

— **Técnicas directas:** Se basan en la medida del hinchamiento inducido en el suelo, o bien en la de la presión necesaria para impedirlo, y se realizan mediante ensayos de tipo edométrico.

La Tabla III recoge los procedimientos de identificación y medida más usuales.

TABLA III

METODOS MAS USUALES DE IDENTIFICACION Y EVALUACION DE SUELOS EXPANSIVOS

TECNICAS INDIRECTAS	Metodos identificativos	Composición de la fracción arcillosa, y eventualmente textura	Difracción de rayos X Microscopía electrónica Análisis térmico diferencial Adsorción de etilen-glicol y glicerina
		Características físicas y fisicoquímicas	Capacidad de cambio de cationes Análisis por sedimentación del contenido coloidal Superficie específica de las partículas de arcilla
		Propiedades índice	Límites de Atterberg Retracción lineal Actividad
		Clasificaciones geotécnicas	Sistema USCS Sistema ASSHO
	Métodos orientativos	Estado del suelo	Humedad Natural Grado de Saturación
		Características organolépticas	Aspecto Estructura
		Ensayo de expansión de Lambe Entumecimiento en el ensayo CBR Índices edométricos	
		Ensayos de expansión en el edométrico	Hinchamiento libre Presión de hinchamiento
	Métodos valorativos	Ensayos de succión	

5.2. Técnicas indirectas de valoración de la expansividad

El método más habitual para la identificación de minerales arcillosos se basa en el espectro característico que resulta de su *difracción* por rayos X (Fig. 13). Este procedimiento es, además, semicuantitativo.

La identificación morfológica de los minerales de arcilla se realiza mediante *microscopía electrónica*, basada en la dispersión que experimenta un haz de electrones al atravesar un material. En las técnicas de *exploración mediante barrido* (S.E.M.) se produce una imagen originada por la excitación de electrones secundarios desde la superficie de las partículas, convenientemente tratadas (Fot. 8 y 9).

En el *análisis térmico diferencial* (A.T.D.) se provocan mediante calentamiento, y al ir alcanzándose determinadas temperaturas, reacciones térmicas características de cada especie mineralógica, que puede ser así determinada.

El *etilen-glicol* y la *glicerina* se utilizan por la facilidad con que son adsorbidos en cantidades diferentes según el tipo de mineral arcilloso. Como es lógico, el método sólo es efectivo en suelos de composición sensiblemente monomineral, lo que no sucede con frecuencia.

La evaluación del *contenido coloidal* ($<2\text{ }\mu$) proporciona una indicación del contenido en arcilla del suelo. Por otra parte, la *superficie específica* de las partículas determina en gran medida su comportamiento, por la importancia que adquieren las fuerzas eléctricas superficiales en los coloides. Finalmente, la *capacidad de cambio iónico* registra la facilidad de los minerales arcillosos para adsorber cationes intercambiables en la superficie de las capas cristalográficas.

Entre los ensayos de identificación de suelos que tienen interés como indicadores de riesgo de expansividad, los *límites de Atterberg* gozan de una amplia aceptación, sobre todo en sus valores correspondientes al límite líquido. Se comprende que esto sea así porque la plasticidad es reflejo, como la expansividad, del porcentaje y tipo de fracción arcillosa. En el mismo sentido es también útil el *límite de retracción*.

Relacionando el índice de plasticidad (IP) con el contenido del suelo en arcilla (reflejado en la fracción granulométricamente inferior a $2\text{ }\mu$), SKEMPTON (1953) estableció una medida de la *actividad coloidal* (A) de la arcilla ($A = IP/\% <2\text{ }\mu$), que a veces se ha utilizado como índice de su expansividad potencial. (Valores típicos son, p.e., A = 0,4 para arcillas caolínicas y 1,6 para las montmorilloníticas).

Los sistemas de clasificación de suelos reconocen en algunos de sus grupos la peligrosidad potencial de los materiales en él incluidos. Las

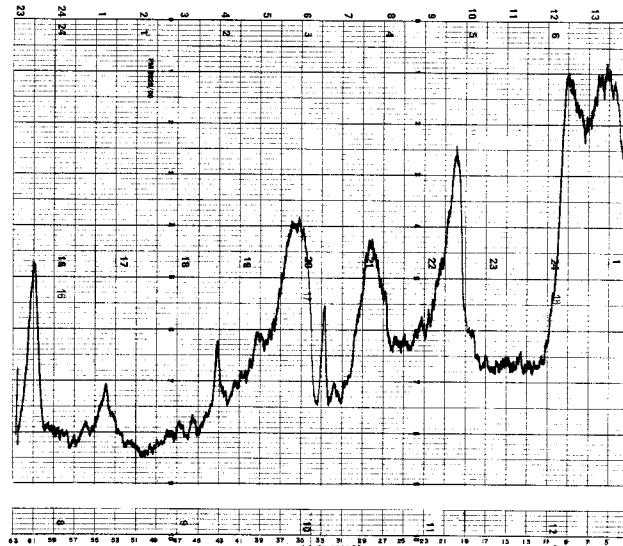
categorías son demasiado generales, sin embargo, para tener un significado preciso desde el punto de vista de la expansividad.

En el *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos* los suelos expansivos se sitúan en su mayor parte en los grupos CL y CH, si bien, desde luego, no todos los suelos de esos grupos manifiestan expansividad, y, por otra parte, existen otros clasificados como MH que pueden exhibirla. En el sistema de clasificación ASSHO los suelos expansivos se encuentran generalmente entre los del grupo A-7, aunque pueden serlo otros incluidos entre los A-6.

Los índices descritos tienen, realmente, un alcance limitado, puesto que para determinarlos no se considera la totalidad del suelo, o se utiliza material remoldeado. No se tiene en cuenta, pues, su estado físico natural, ni su fábrica. La información obtenida se refiere básicamente al tipo y cantidad de minerales arcillosos.

La *humedad natural de equilibrio* se establece, en gran parte, de acuerdo con la naturaleza del terreno. Por otro lado, se comprende que un suelo circunstancialmente desecado tienda a recuperar la humedad de equilibrio, con el consiguiente entumecimiento. Por ello, la relación entre la humedad natural con la correspondiente al límite plástico se ha utilizado como un índice de riesgo de expansividad.

El *grado de saturación* representa, de alguna manera, el déficit de humedad respecto a un contenido máximo potencial, constituyendo otro índice que puede reflejar su potencialidad expansiva.



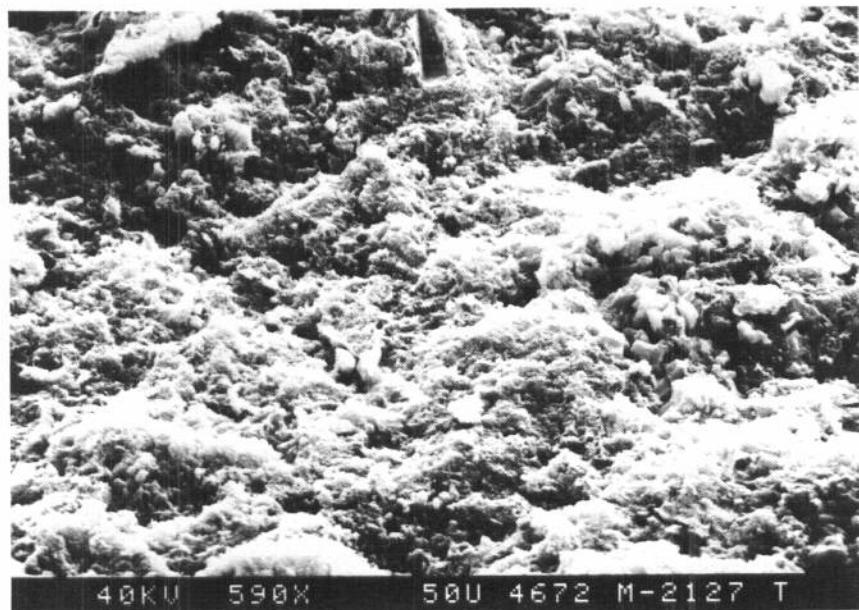


Foto N.^o 8.—Textura superficial de una arcilla expansiva consolidada obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (Mioceno del Sur de Madrid).

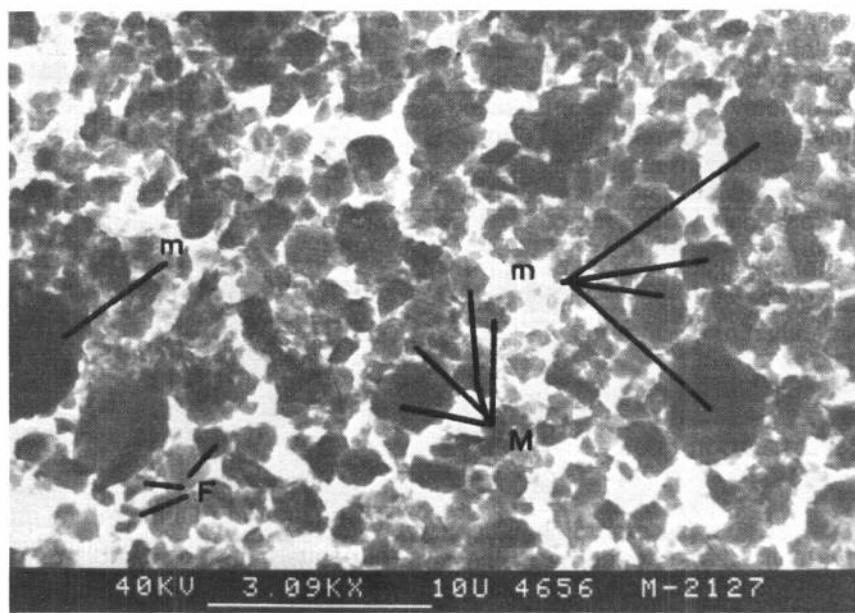


Foto N.^o 9.—Microfotografía al microscopio electrónico de la arcilla anterior (m, Montmorillonita; M, Mica; F, Feldespato).

Otro ensayo sencillo de cualificación es el dado por HOLTZ y GIBBS (1956), basado en un ensayo llamado «volumen de sedimentación». El ensayo consiste en verter lentamente 10 cm³ de suelo seco pasado por el tamiz n.^o 40 en una probeta de 100 cm³ llena de agua y en observar el aumento de volumen debido al hinchamiento. El resultado se expresa en % de aumento de volumen respecto al volumen inicial (10 cm³). Según los autores citados, los suelos que dan un aumento de volumen superior al 100% pueden presentar un cambio de volumen importante cuando se humedecen bajo presiones ligeras. Si, por el contrario, el cambio de volumen en el ensayo es inferior al 50%, cabe esperar que el suelo no presente cambios de volumen apreciables.

Finalmente, para completar el apartado de técnicas indirectas, hay que referirse a las características organolépticas que frecuentemente presentan los suelos expansivos. Son muy significativas su adherencia a los objetos, la persistencia de las deformaciones en estado seco, el desarrollo de grietas, etcétera.

5.3. Técnicas directas de valoración de la expansividad

Una de las técnicas más usuales es el ensayo de expansividad desarrollado por Lambe. El método de Lambe utiliza muestra remoldeada después de pasar el suelo por el tamiz ASTM n.^o 10. Se trata, por consiguiente, de un ensayo en que se destruye la textura originaria del suelo, produciendo además una segregación de sus componentes, y que no tiene en cuenta la humedad natural. Consecuentemente sólo proporciona una valoración relativa de su capacidad de hinchamiento. Sin embargo, se trata de un ensayo muy extendido y útil en los criterios de clasificación de la peligrosidad potencial de los suelos, dada la economía y rapidez de su realización.

El procedimiento de ensayo es, en síntesis, como sigue. La muestra de suelo, compactada en unas condiciones determinadas de humedad, se sitúa en un anillo limitado verticalmente por placas porosas, y se carga a una presión nominal de 1 T/m². A continuación se inunda la muestra y se mide al cabo de 2 horas, mediante un anillo dinamométrico, la presión alcanzada. Esta presión se designa con el nombre de «índice de expansividad» y se expresa en Kp/cm². Este índice de expansividad se relaciona con curvas patrones correspondientes a las condiciones iniciales de compactación (suelo seco, húmedo o con humedad correspondiente a su límite plástico), obteniéndose otro índice denominado «cambio potencial de volumen» (PVC), que califica el potencial expansivo del suelo (Fig. 14).

El ensayo de expansión puede también realizarse con muestras compactadas en el molde C.B.R., aumentando el tiempo de inundación. El entumecimiento que se obtiene con este ensayo puede indicar también el grado de peligrosidad del suelo.

De la posición relativa de las curvas de carga y descarga obtenidas en el edómetro puede obtenerse información respecto a la capacidad expansiva del suelo.

Sin embargo, los ensayos cuantitativos que, en definitiva, valoran mejor la expansividad del suelo, son los que se expresan en términos volumétricos o de presión.

Para evaluar la inestabilidad volumétrica se recurre al ensayo de *hinchamiento libre*. Consiste, en síntesis, en medir el hinchamiento vertical que se observa en el edómetro después de permitir el acceso libre de agua sobre la muestra, bajo una presión vertical del orden de 1 T/m². Las posibilidades de ensayo son múltiples, existiendo algunas discrepancias de acuerdo con el momento en que se inunda la muestra con la sobrecarga aplicada.

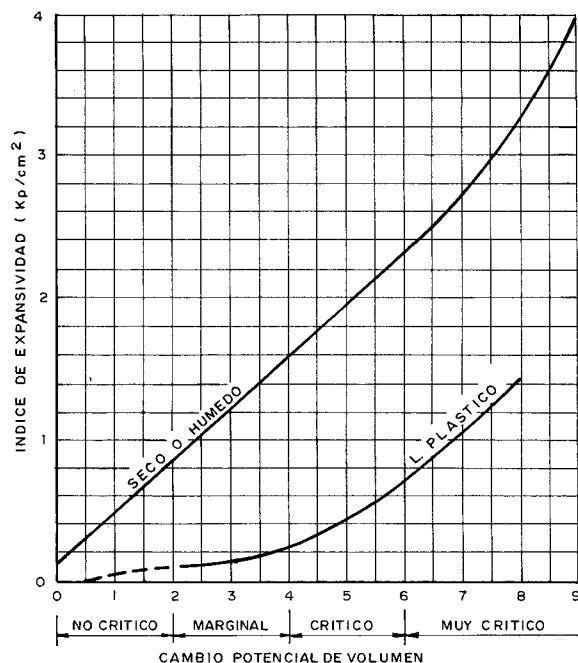


Fig. 14.—Criterio de expansividad de Lambe (Lambe, 1960).

Si de lo que se trata es de cuantificar la presión desarrollada en el proceso de expansión, se impide el cambio de volumen de la muestra tras inundar el edómetro, midiendo la sobrecarga precisa para impedirlo (Ensayo de presión de hinchamiento).

Generalmente, en la práctica, se utilizan unos órdenes de magnitud para calificar la expansividad a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio citados anteriormente. Es usual utilizar sólo cuatro grados de expansividad (baja, media, alta y muy alta), y así lo ha hecho RODRIGUEZ ORTIZ (1975) en la recopilación de criterios prácticos de expansividad. La Tabla IV resume esta recopilación de criterios de diferentes autores, con los intervalos de variación de parámetros más usuales.

En alguna ocasión se ha intentado relacionar más de un parámetro, y así lo han hecho SEED y col. (1962) combinando la actividad y el contenido de arcilla (Fig. 15), y también VIJAYVERGIYA y GHAZZALY (1973), que establecieron una correlación entre la presión de hinchamiento (o el hinchamiento libre), el límite líquido y el índice I_{LL} , que relaciona la humedad natural con el límite líquido. Sus resultados pueden verse en la Fig. 16.

Trabajando con los datos de estos autores, CUELLAR (1978) estableció una clasificación análoga, pero basada en el límite plástico, pudiendo trabajar de esta forma con el *índice de desecación*, I_{IP} (relación entre la humedad y el límite plástico). La Fig. 17 muestra el criterio de CUELLAR.

Sin embargo, casi todos estos criterios se apoyan en datos locales e introducen —aún sin decirlo— condicionamientos que no han de cumplirse en otros tipos de arcillas que las utilizadas para elaborar el criterio.

Los ensayos de hinchamiento, presión de hinchamiento, etc. presentan el inconveniente de que imponen al suelo unas condiciones límites, en cuanto a su inundación total (inconvenientes parcialmente subsanado por técnicas más elaboradas). Además, en las muestras muy consolidadas el acceso de agua a su interior puede demorarse incluso varios meses, por

TABLA IV
CRITERIOS DE EXPANSIVIDAD (RECOPIADOS POR R. ORTIZ, 1975) 2a

Expansividad	Límite de retracción	I_p	W_L	% #200	% < 0.001 mm	Actividad $I_p / \# 2\mu$ (Skempton mod.)	Potencial de hinchamiento (Seed) %	Índice Lambe Kg/cm ²	Presión de hinchamiento probable Kg/cm ²	Hinchamiento probable en superficie (cm) (McDowell)	% de hinchamiento probable
Baja	> 15	< 18	< 30	< 30	< 15	< 0.5	0 - 1.5	< 0.8	< 0.3	0 - 1	< 1
Media	12 - 16	15 - 28	30 - 40	30 - 60	13 - 23	0.5 - 0.7	1.5 - 5.0	0.8 - 1.5	0.3 - 1.2	1 - 3	1 - 5
Alta	8 - 12	25 - 40	40 - 60	60 - 95	20 - 30	0.7 - 1.0	5 - 25	1.5 - 2.3	1.2 - 3.0	3 - 7	3 - 10
Muy alta	< 10	> 35	> 60	> 95	> 30	> 1.0	> 25	> 2.3	> 3	> 7	> 10

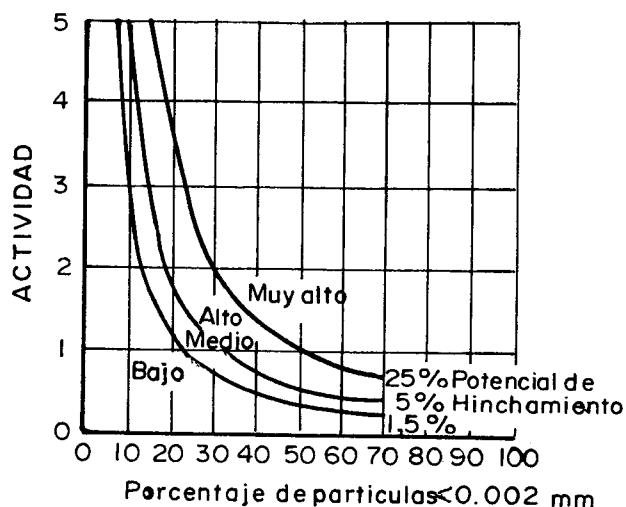


Fig. 15.—Criterio de Seed, Woodward y Lundgren para calificar el potencial de hinchamiento de una arcilla.

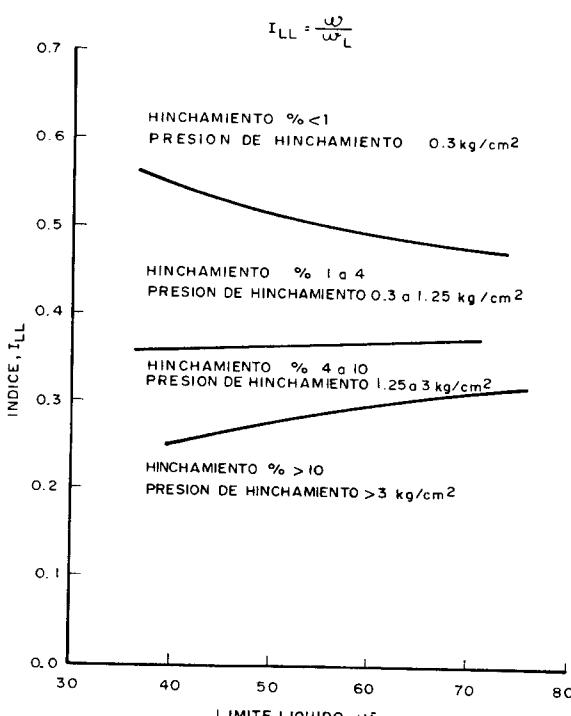


Fig. 16.—Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973).

lo que no desarrollan todo su potencial expansivo en el tiempo usual de ensayo.

$$I_{Ip} = \frac{\omega}{\omega_p}$$

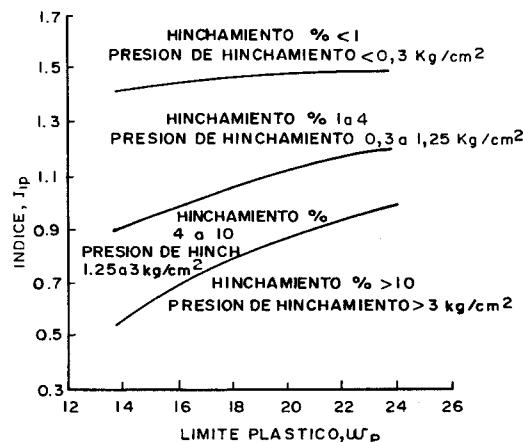


Fig. 17.—Relaciones entre el índice de sequedad, el límite plástico y la presión de hinchartamiento (Cuellar, 1978).

La hipótesis de una imbibición total de agua del suelo es, en la realidad, poco probable. Por ello, las técnicas cuantitativas anteriormente reseñadas pueden calificarse de conservadoras.

Puesto que la afinidad del suelo por el agua está condicionada por campos de fuerzas de cuya componente final resulta la succión, la cuantificación de su magnitud será una medida del potencial expansivo del suelo. Reuniendo los procedimientos descritos, estos es, midiendo el hinchartamiento en función de los valores de succión se obtendrán las magnitudes más próximas a la realidad. Este es el procedimiento seguido en los edómetros de succión.

La succión representa el nivel energético disponible para que puedan producirse los fenómenos de expansión. Si ésta se inicia se produce correlativamente una modificación de la energía del agua intersticial, que está representada, de alguna manera, con un cambio en la succión.

Su magnitud se determina mediante dos caminos diferentes, unos de tipo mecánico, en que se evalúa el potencial del agua en el suelo, y otros de tipo termodinámico, en que se cuantifica la fuerza que hace que el agua se mueva en el suelo. Esta fuerza se valora relacionando la energía libre del agua del suelo con la que tiene fuera de él, mientras que el potencial del agua en el suelo puede medirse aplicando directamente una tracción al agua, puesta en contacto con el suelo, o imponiendo una presión neumática a la fase gaseosa contenida en la muestra.

Entre los métodos basados en criterios mecánicos hay que reseñar la placa de succión, el

tensiómetro y la membrana de presión; entre los de tipo termodinámico, el desecador de vacío, la balanza de sorción, las células de yeso, el piezómetro de succión, el papel de filtro y el psicrómetro. En la bibliografía se recogen varias publicaciones en que están descritos estos procedimientos (ESCARIO, 1969; ESCARIO y SAEZ, 1973; CUELLAR, 1978; POUSADA, 1984; SAEZ, 1986).

6. FISIOGRAFIA DE LA EXPANSIVIDAD EN ESPAÑA

6.1 Clasificación climática de España

Las alternativas estacionales de humedad pueden ser valoradas mediante diferentes índices climáticos. Pero para la determinación de estos índices se requiere, en general, un número elevado de datos, que con frecuencia no resultan disponibles. La limitación en la adquisición de parámetros climáticos obliga a prescindir de alguna de las clasificaciones climáticas más completas.

El índice de Thornthwaite es relativamente fácil de obtener, y por ello los tipos climáticos basados en él han tenido una mayor aceptación en España para evaluar los cambios estacionales de humedad. La clasificación se basa en la disponibilidad de agua del suelo a lo largo del año, diferenciada por períodos mensuales.

El índice de Thornthwaite viene dado por la fórmula:

$$I = (100D - 60d) / E_p$$

en la que «D» representa la cantidad de agua eliminada del suelo por drenaje (equivalente al exceso de precipitación no eliminado por evaporación ni retenido por el terreno); «d» es el déficit de agua cuando no se produce drenaje y «E_p» la evapotranspiración potencial (que representa la evaporación máxima posible).

Cuando este índice es negativo, el terreno puede estar sometido en algún periodo del año a una evaporación que supere los valores de precipitación, desequilibrio que tiende a ser compensado a partir de la humedad retenida por el suelo. Cuanto menor es el índice, mayor es en general el período de sequía. Sin embargo, en caso de sequedad extrema las alternativas estacionales son poco contrastadas. Por ello, el máximo desequilibrio de humedades suele producirse para índices no excesivamente negativos.

De acuerdo con el valor del índice de Thornthwaite pueden establecerse los siguientes tipos climáticos:

<i>Indice</i>	<i>Clima</i>
> 100	Perhúmedo
100 - 20	Húmedo
20 - 0	Subhúmedo
0 - 20	Seco
-20 - 40	Semiárido
<-40	Arido

La figura 18 sintetiza el mapa climático de España según el índice de Thornthwaite, basado en los trabajos de JUSTO y CUELLAR (1972) y RODRIGUEZ ORTIZ (1975), con algunas nuevas aportaciones. Las zonas de riesgo expansivo coinciden con áreas climáticas deficitarias en humedad, pero en especial con las climatologías simplemente secas, en las cuales los contrastes estacionales están más acentuados. En los climas áridos las alternativas de humedad significativas tienden a registrarse en períodos hiperanuales, por lo que sus consecuencias pueden demorarse incluso varios años.

6.2 Vertisuelos

El desarrollo territorial de estos suelos expansivos es importante en la mitad Sur de España, especialmente en la franja andaluza, según se desprende del *Mapa de Suelos de España* (Instituto de Edafología, 1967). Su extensión en dicho territorio podría superar los 7.500 km², lo que representa casi un 9 % de la superficie total de Andalucía. Más de la mitad de estos suelos (unos 4.500 km²) se localizan en la vertiente meridional de la cuenca del Guadalquivir.

El sustrato de los vertisuelos corresponde, una gran parte de los casos, a rocas arcillosas ricas en sales cárnicas (como el de las a menudo llamadas «margas azules» del Guadalquivir, en realidad arcillas margosas). Morfológicamente ocupan regiones de topografía poco diferenciada, y la climatología oscila de condiciones subhúmedas a semiáridas. Estas características coinciden en España frecuentemente con cuencas interiores meridionales colmatadas por sedimentos miocenos (Fig. 19).

Las condiciones más favorables se producen en Andalucía y sobre las arcillas calcáreas miocenas, y por eso es aquí donde los suelos vérticos tienen un desarrollo generalizado (Fot. 10).

DUCHAFOUR (1977), describe el perfil de un vertisuelo típico localizado en la carretera Córdoba-Sevilla: Su profundidad alcanza 1,50 m; el contenido en arcilla es elevado, muy uniforme en todo el perfil, con un 54 % de arcilla expansiva (montmorillonita dominante e illita); el porcentaje en carbonato cálcico es similar al

de la roca madre, de un 15 %; la proporción de limo cuarcoso se eleva al 30 %. El color es gris oscuro, debido a la presencia de humus.

Una circunstancia importante es que fuera de las zonas con mal drenaje no se desarrollan vertisuelos, por lo que en las laderas y colinas los colores del terreno son más claros. En cualquier caso, estos suelos residuales heredan la montmorillonita de la formación basal, por lo que tiene asimismo propiedades expansivas.

A veces los suelos vérticos se desarrollan sólo en condiciones morfológicas que corresponden a entornos muy concretos. Este es el alcance de algunas formaciones de este tipo existentes en la zona oriental de Madrid, que ocupan microáreas deprimidas.

En cualquier caso, puesto que los vertisuelos se desarrollan en gran parte sobre formaciones arcillosas potencialmente expansivas, en el *Mapa Previsor de Riesgos* queda reflejada en general esa peligrosidad. No obstante, los reconocimientos geotécnicos de detalle deben tener en cuenta su posible presencia en las zonas climática y morfológicamente favorables, independientemente de la naturaleza del sustrato.

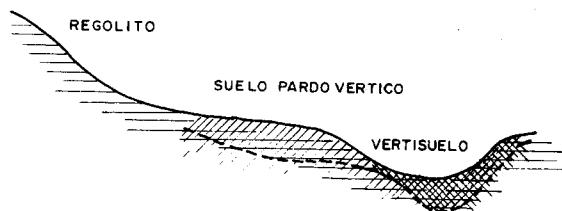


Fig. 19.—Desarrollo de vertisuelos expansivos sobre margas en climas semiáridos (Según Duchaufour, 1977).

La profundidad «activa» de los vertisuelos alcanza, al menos, a todo su espesor, ya que las grietas que se abren estacionalmente en ellos profundizan la desecación. Esta profundidad está, pues, muy vinculada a su potencia, y aunque ésta suele ser de poco más que de orden métrico, normalmente se citan profundidades activas de 2 a 3 m.

En suelos de carácter residual, existentes en ocasiones junto a vertisuelos, la profundidad activa puede superar los valores señalados. Hay que tener presente que en el contacto entre el *regolito* y el sustrato puede a veces emplazarse una capa freática, cuyas alternativas se reflejarán en la franja de terreno afectada por las variaciones de humedad estacional (o anual). Una de las variables a investigar antes de decidir el alcance de la franja activa es, pues, saber si existe o no un nivel freático semiprofundo.

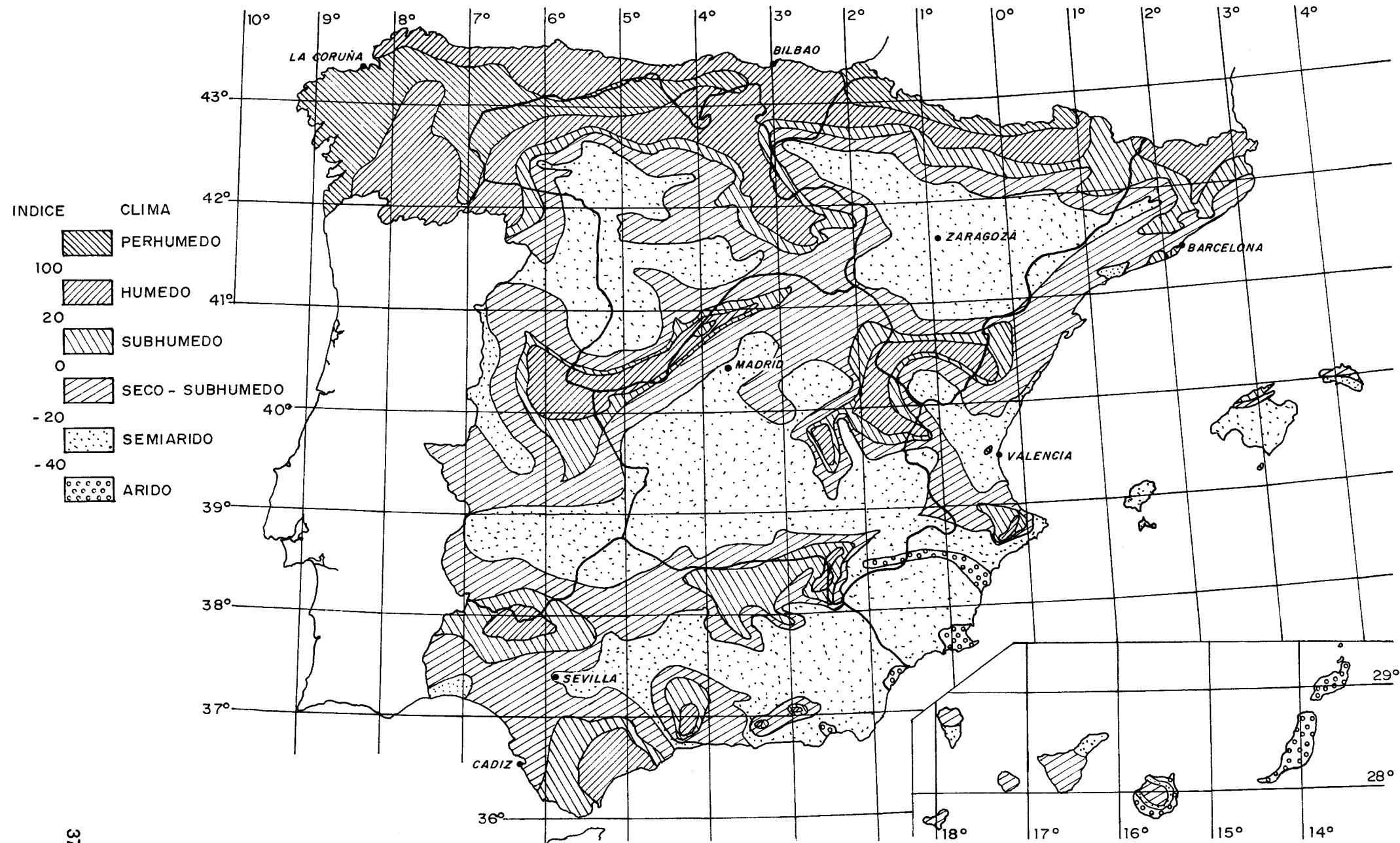


Fig. 18 Mapa climático simplificado de España con los índices Thornthwaite (Completado de Justo y Cuéllar, 1972 y Rodríguez, 1975).

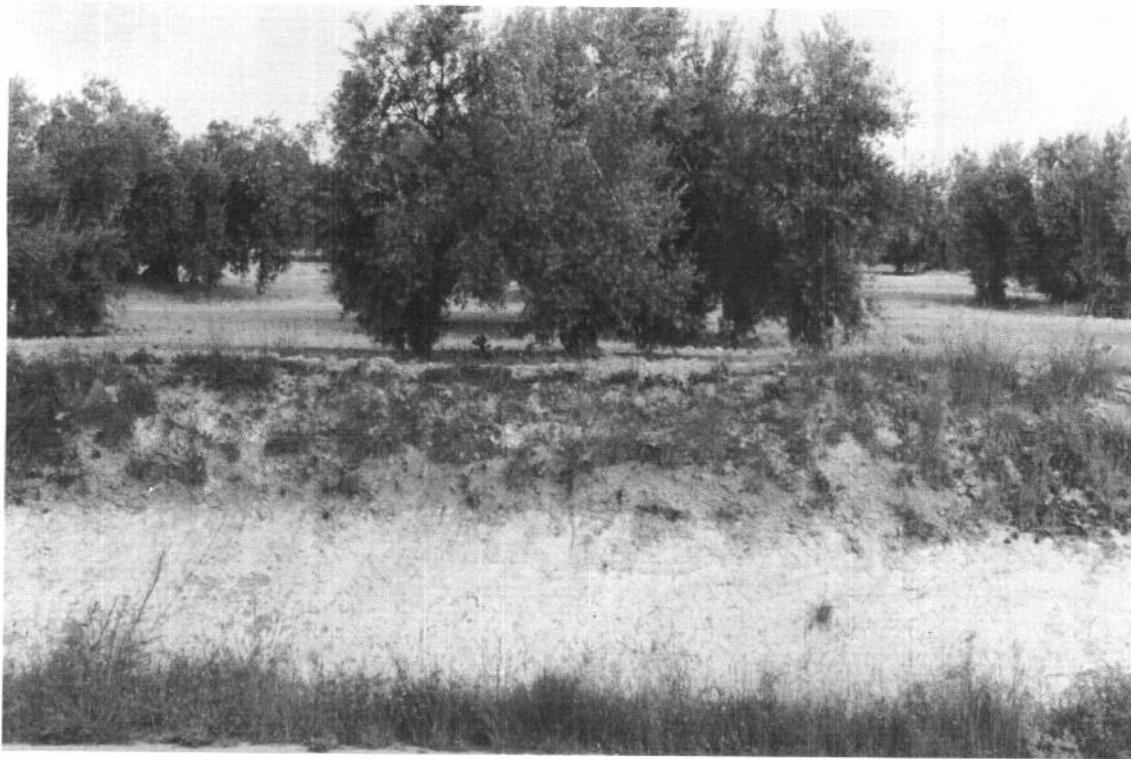


Foto N.^o 10.—Sección de un vertisuelo castaño en la provincia de Jaén.

En climas áridos y morfologías suaves (zonas de Andalucía y Levante), es algo frecuente, por otra parte, el desarrollo de *caliches* superficiales, y de *costras calcáreas* dentro del perfil del suelo. El nivel de acumulación de sales señala el límite secular de transferencia capilar de humedad ascendente, por lo que, de alguna manera, su situación viene a limitar la incidencia del nivel freático y, con ello, la profundidad activa.

6.3 Suelos arcillosos de origen volcánico

Los suelos procedentes de la alteración de materiales volcánicos tienen con frecuencia una elevada capacidad expansiva, debido a la naturaleza montmorillonítica, y a veces incluso bentonítica (s.e.) de la arcilla neoformada.

Se trata, en general, de formaciones que cabe clasificar como *recubrimientos*. Menos frecuentemente la meteorización interesa niveles de suelos intercalados en secuencias rocosas. Otras veces la alteración puede ser de origen hidrotermal, por lo que puede afectar a profundidades muy variables.

Dentro del territorio peninsular español existen manifestaciones volcánicas generalizadas en las provincias de Gerona y Ciudad Real. En esta última región volcánica se ha producido algún problema debido a la expansividad de horizontes arcillosos de alteración. Sin embargo, en

otras ocasiones, a pesar del alto contenido en montmorillonita de estas arcillas volcánicas, la presencia de niveles freáticos permanentes ha evitado problemas.

En la zona volcánica del Cabo de Gata, al SE de Almería, se han explotado bentonitas procedentes de alteración hidrotermal.

En todos los casos se trata de accidentes de desarrollo muy restringido que no resultan cartografiados a la escala de trabajo desarrollada. Unicamente cabe advertir de su posible presencia en aquellos territorios.

Pero es en las Islas Canarias donde los suelos arcillosos de procedencia volcánica alcanzan un verdadero desarrollo. Corresponden a alteraciones «*in situ*» o, más generalmente, a suelos transportados procedentes de depósitos *coluviales* o *aluviales*, en algún caso *lagunares*. Estos suelos son, probablemente en muchos casos, montmorilloníticos, como señalan unos límites líquidos con frecuencia superiores a 50.

Su capacidad de hinchamiento no siempre resulta ser tan elevada como cabría esperar de la naturaleza montmorillonítica de la arcilla. GONZALEZ VALLEJO (1979) explica esta circunstancia, para suelos procedentes de La Laguna, por condiciones texturales que determinan que el suelo tenga sólo una expansividad moderada.

En suelos arcillosos texturalmente menos maduros que los de procedencia lagunar, tales como los generados por alteración de *piroclastos* medios y gruesos, cabe pensar en una importante porosidad residual que limite su capacidad de hinchamiento. En el mismo sentido incide la fracción no arcillosa que, como la porosidad, suele ser importante en los suelos transportados.

Existen, sin embargo, localmente materiales de *fuerte contenido bentonítico*, que en gran parte pueden proceder de la alteración de formaciones piroclásticas finas, con una considerable inestabilidad volumétrica. En las zonas de baja pendiente se desarrollan vertisuelos expansivos (Fig. 20).

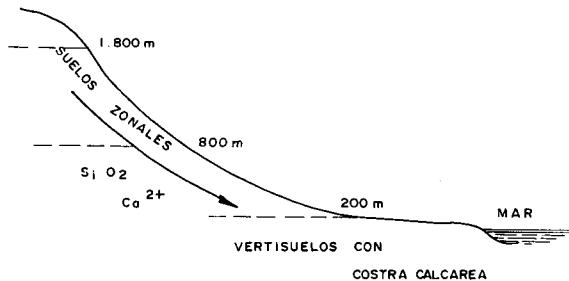


Fig. 20.—Desarrollo de vertisuelos expansivos en Canarias (según Caldas y Salguero, 1975, recogido por Duchaftour, 1977).

6.4 Sustratos arcillosos paleozoicos

Se trata de formaciones cronológicamente residuales, y están escasamente representadas en España. Sus afloramientos se reducen a algunas manchas en Andalucía y hacia el Pirineo.

La presencia de arcillas en los sedimentos es, además, limitada, ya que están más o menos transformadas. La capacidad expansiva es, en cualquier caso, escasa o nula.

6.5 Sustratos arcillosos mesozoicos

Son importantes en España los de *edad triáctica* (facies germánica), caracterizada en sus pisos superiores por una *facies Keuper* muy arcillosa. (Por el contrario, los términos inferiores suelen ser muy detríticos). De todos los afloramientos arcillosos mesozoicos, no menos del 50 % corresponden a arcillas del Keuper.

Este tipo de sedimentos, de aspecto característico (coloraciones rojas y ocres con tramos grisáceos), se encuentran muy extendidos por casi toda la geografía española. Las arcillas están asociadas a sedimentos detríticos y a facies calcáreas y yesíferas.

Estructuralmente suelen estar muy perturbados, por lo que sus características puntuales no

son espacialmente continuas. Sin embargo, la naturaleza de la fracción arcillosa corresponde en buena parte a la originaria, habiéndose preservado arcillas esmécticas sin transformar. La capacidad expansiva atribuible intrínsecamente al Keuper depende en gran medida de la proporción en que aquellas se presentan. En algunos casos puede ser importante, según se deduce de la naturaleza mineralógica de algunas de estas arcillas (RODRIGUEZ y PRIETO, 1976), en función de la zona en que se encuentren:

Cantábrica: Minerales esmécticos a techo.

Pirenáica: No existen prácticamente minerales expansivos.

Catalánea: Minerales arcillosos de tipo illítico, poco expansivos.

Ibérica: Sólo existen minerales expansivos en niveles superiores, pero son importantes.

Levantina: Los minerales expansivos son a veces predominantes, pero no mayoritarios.

Andaluza: No existen claramente minerales expansivos, aunque los interestratificados hinchables pueden ser importantes.

Se insistirá en que la capacidad de hinchamiento está condicionada por las alternativas climáticas, por lo que el factor riesgo puede ser inferior al deducido de la litología, si los afloramientos se localizan en regiones húmedas.

En los pisos inferiores del Triás pueden también encontrarse episodios arcillosos, aunque con carácter restringido.

Las litologías arcillosas de *edad jurásica* están en general asociadas a facies carbonatadas, que con frecuencia conducen a la formación de margas, calizas o dolomías. Predominan claramente los materiales rocosos, y tan sólo en contados casos pueden diferenciarse, a la escala de trabajo desarrollada, suelos netamente arcillosos. Estas formaciones no deben producir problemas derivados de la expansividad.

En circunstancias parecidas se encuentran los términos arcillosos de *edad cretácica*, aunque sus afloramientos son más numerosos (orientativamente del orden de cuatro veces más), y están litológicamente más diversificados. Aparecen, de manera principal, en las Cordilleras Cantábrica e Ibérica, región Bética e islas Baleares. Los litotipos son, aproximadamente en la mitad de los casos, mixtos, con facies detríticas junto a autígenas no arcillosas. Se encuentran también sedimentos arcillosos muy carbonatados y otros acompañados predominantemente de materiales detríticos. En algunos casos aislados pueden encontrarse arcillas junto a yesos (Santander, Ciudad Real, Cuenca o Guadalajara). La capacidad expansiva atribuible a todas estas formaciones arcillosas es en conjunto escasa o moderada.

6.6 Sustratos arcillosos cenozoicos

Las formaciones arcillosas tienen, en gran parte, características litológicas que se prolongarán frecuentemente durante todo el Terciario. De hecho, resulta difícil en ocasiones dilucidar el límite de los sedimentos del Cenozoico inferior del superior, que son los claramente predominantes.

Globalmente, sin embargo, los sedimentos más antiguos son más detriticos y estructuralmente están más perturbados; por otra parte, los procesos de consolidación han tenido más posibilidades de actuar. De todo ello se desprende que su capacidad expansiva es estadísticamente inferior que para las formaciones arcillosas del Terciario superior.

Las formaciones arcillosas del Cenozoico más reciente son las más importantes desde el punto de vista de la expansividad, tanto por la naturaleza frecuentemente montmorillonítica de las arcillas, como por la extensión que alcanzan sus afloramientos. Estos se encuentran, además, emplazados, con carácter general, en áreas morfológicamente deprimidas y sujetas a condiciones de aridez.

Existen todas las posibilidades litológicas, y estructuralmente las unidades están, en conjunto, poco perturbadas. Aunque los sedimentos pueden haber estado sometidos a procesos diagenéticos en sus estadios iniciales, no existen en general transformaciones que modifiquen esencialmente la naturaleza de la arcilla original. Esta es, con frecuencia, como se ha señalado, montmorillomítica, lo que se refleja en unas plasticidades en general elevadas (Figs. 21 y 22).

Todas estas circunstancias determinan una importante capacidad expansiva de las formaciones arcillosas del Terciario superior. El riesgo de expansividad puede ser en ocasiones considerable para las dos Mesetas (en especial para la Meseta Sur), Cuenca del Ebro, Andalucía y para zonas de Levante (particularmente en Murcia) y Extremadura (entorno de Badajoz).

7. CLASIFICACION DE SUELOS POTENCIALMENTE EXPANSIVOS EN ESPAÑA

7.1 Metodología

La capacidad expansiva de los suelos está condicionada por numerosas variables. Si en último término depende de características intrínsecas de los mismos, las condiciones en que se encuentran y, más específicamente, las modificaciones que se introduzcan a su estado natural, determinan que esa capacidad pueda o no desarrollarse. Cualquier intento de valoración de la expansividad de un suelo debe, pues, recoger esas alternativas.

En los epígrafes anteriores se han detallado las características *intrínsecas* y *extrínsecas* que establecen el potencial de hinchamiento de un suelo, y su incidencia en su expansividad real. Los criterios de valoración del riesgo expansivo que ahora se establecen —dentro del propósito de fijar el riesgo de expansividad en España— pretenden sintetizar la importancia relativa de las distintas variables implicadas en el fenómeno. Y ello teniendo siempre presente que las modificaciones impuestas por la actuación humana serán tanto más críticas cuanto mayor sea la capacidad expansiva del suelo.

La Tabla V resume los criterios seguidos para llevarlo a cabo, que comprenden dos líneas concurrentes de actuación:

— *Definición de unidades cronolitológicas y vinculación al clima.*

— *Revisión sectorial de ensayos de expansividad, contrastados con eventuales problemas derivados de la misma, y adscripción a las diferentes unidades cronolitológicas.*

La primera línea de actuación tiende a asegurar una clasificación de suelos donde coexisten unas características mineralógicas, texturales y estructurales equiparables (*facies e historia geológica equivalentes*). Esto conlleva una capacidad expansiva específica de la formación sedimentaria, que, a nivel global, permite ser relacionada con otras similares. Esta capacidad expansiva específica se matizaría después de acuerdo con el *índice climático* de la zona en que se localizaba.

Al mismo tiempo, la adscripción a las *unidades cronolitológicas* de ensayos de expansividad, completados eventualmente con otros de plasticidad para disponer de un mayor número de datos, permitió valorar las alternativas expansivas inherentes a la formación sedimentaria y, consecuentemente, evaluarlas. En el caso de existir referencias a problemas constructivos concretados a un tipo de suelo, la formación se definió obviamente como de máximo riesgo de expansividad.

Estos criterios han facilitado la posterior integración de todos los datos disponibles, tanto de la naturaleza geológica del suelo como de su expansividad, evitando en lo posible los errores de correlación a formaciones litológicas de las que no se disponía de datos geotécnicos.

Finalmente hay que señalar que, como base de partida, y para facilitar una mejor integración de datos, se juzgó útil referirlos a *ámbitos territoriales* con unas características relacionables. Para ello se clasificó el territorio en estudio en zonas de actuación que compartieran unas ciertas generalidades geológicas, morfológicas y climáticas (peculiaridades en parte coincidentes con cuencas hidrográficas). Estos

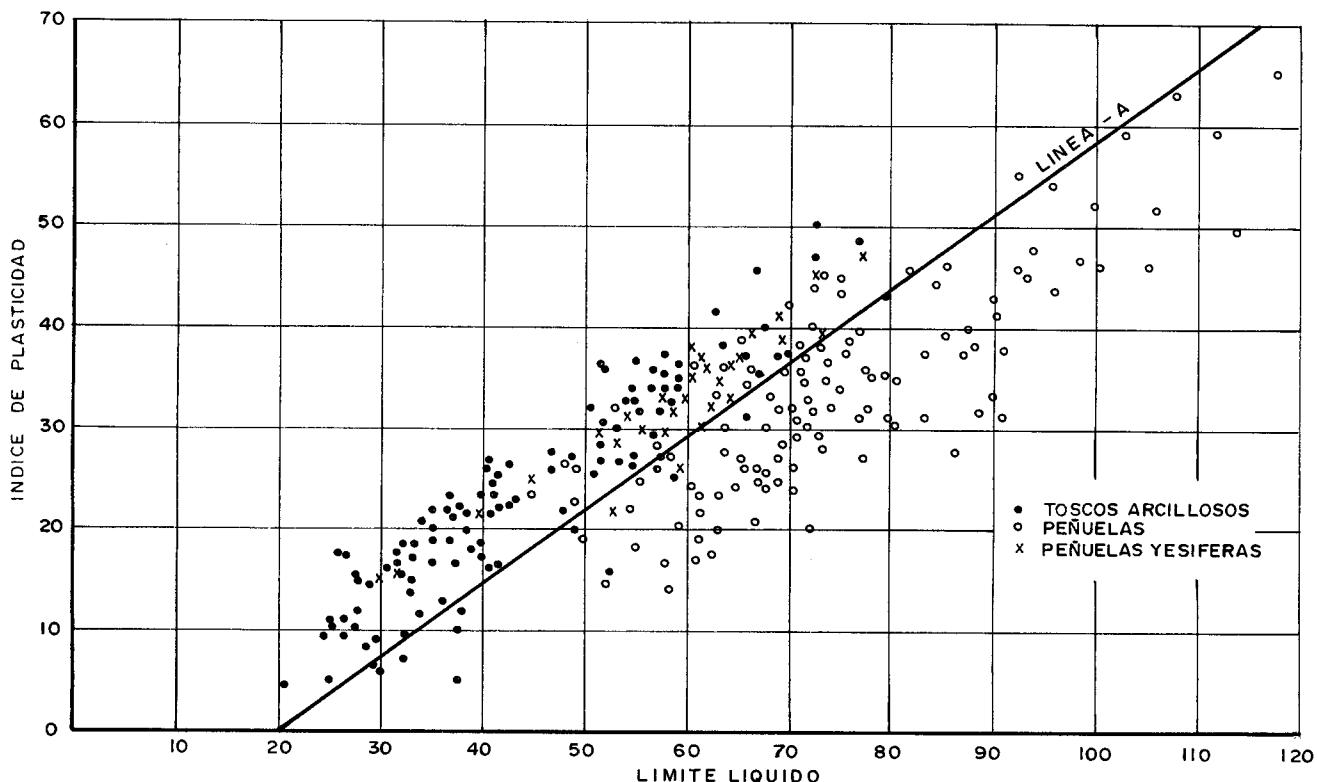


Fig. 21 Propiedades plásticas de los suelos arcillosos de Madrid.

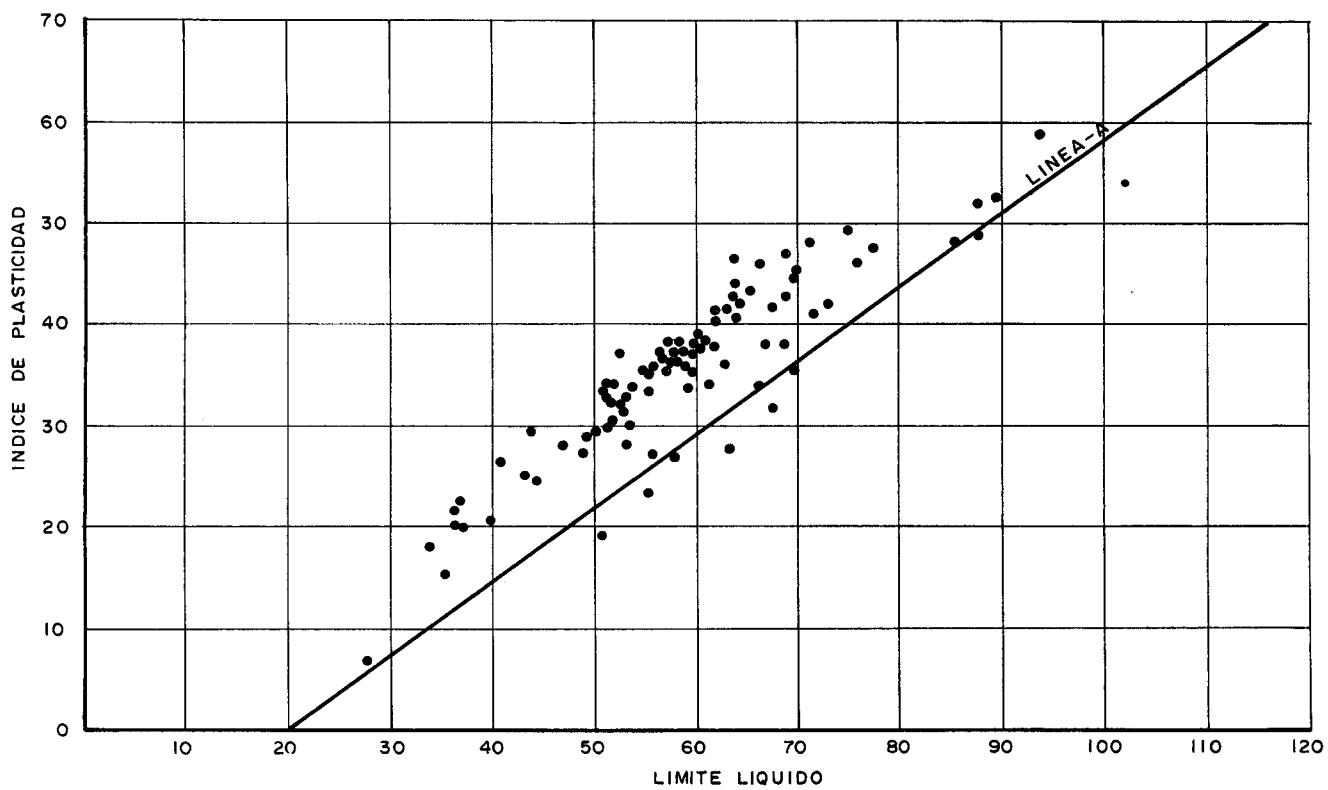
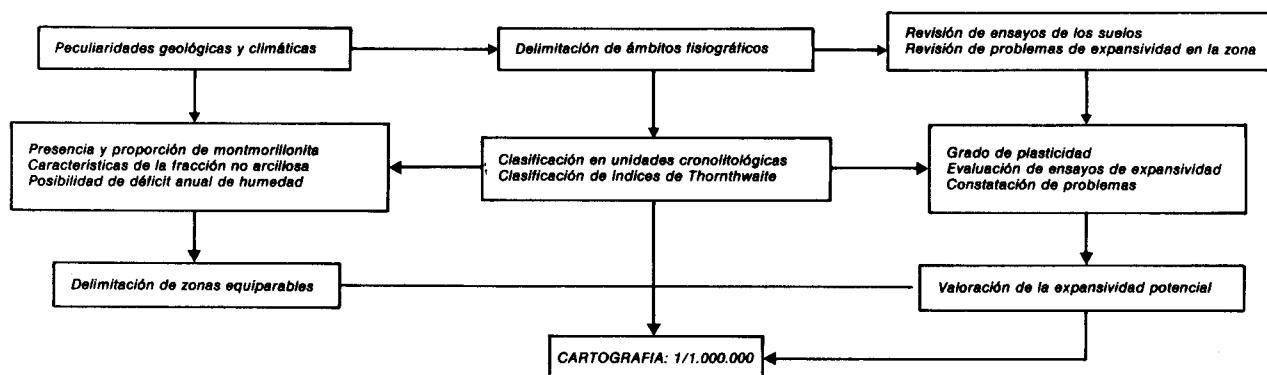


Fig. 22 Propiedades plásticas de las arcillas andaluzas.

Tabla V
Metodología para la clasificación de arcillas expansivas en España



dominios fisiográficos, con sus áreas de actuación, fueron los siguientes:

Cornisa Cantábrica: Alava, Asturias, Cantabria, Guipúzcoa, La Coruña, Lugo, Orense, Pontevedra, Vizcaya.

Cuenca del Ebro: Huesca, Lérida, Navarra, Rioja, Teruel, Zaragoza.

Franja extremeña: Badajoz, Cáceres, Salamanca, Zamora.

Meseta Norte: Ávila, Burgos, León, Palencia, Segovia, Soria, Valladolid.

Meseta Sur: Albacete, Ciudad Real, Cuenca, Guadalajara, Madrid, Toledo.

Franja levantina: Alicante, Baleares, Barcelona, Castellón, Gerona, Murcia, Tarragona, Valencia.

Franja andaluza: Almería, Cádiz, Canarias, Ceuta, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Málaga, Melilla, Sevilla.

En la figura 18 aparecen delimitados estos ámbitos territoriales de actuación.

7.2 Valoración de la expansividad a partir de índices sencillos

Los ensayos cuantitativos de expansividad son los únicos que permiten finalmente valorar la capacidad expansiva de un suelo. No obstante, estos ensayos son a veces complejos y resultan en general insuficientes en número cuando se pretende conocer la peligrosidad potencial de extensas formaciones litológicas. Por otra parte, si se dispone con frecuencia de otros datos de composición y plasticidad de los suelos cuya correlación con su potencial expansivo permitiría evaluarlo a nivel de riesgo.

Una de las tareas acometidas en este trabajo ha sido, teniendo en cuenta las circunstancias mencionadas, comprobar y, alternativamente, poner a punto algunos criterios e índices de referencia, basados en propiedades sencillas de los suelos o documentadas con frecuencia, que permitieran remitir a ellas el riesgo de expansividad de los suelos españoles.

Se han revisado las correlaciones más frecuentemente recogidas en la bibliografía. Entre ellas las establecidas por SEED y col. (1962), VIJAYVERGIYA y GHAZZALY (1973) y CUELLAR (1978), junto a algún índice basado en la actividad de la arcilla. En la figura 23 puede verse, por ejemplo, la aplicación del criterio de SEED y col. a los suelos arcillosos de Madrid.

Algunas otras correlaciones se han estudiado específicamente para los suelos españoles, relacionando parámetros como la plasticidad, densidad y humedad natural con índices cuantificadores del potencial expansivo.

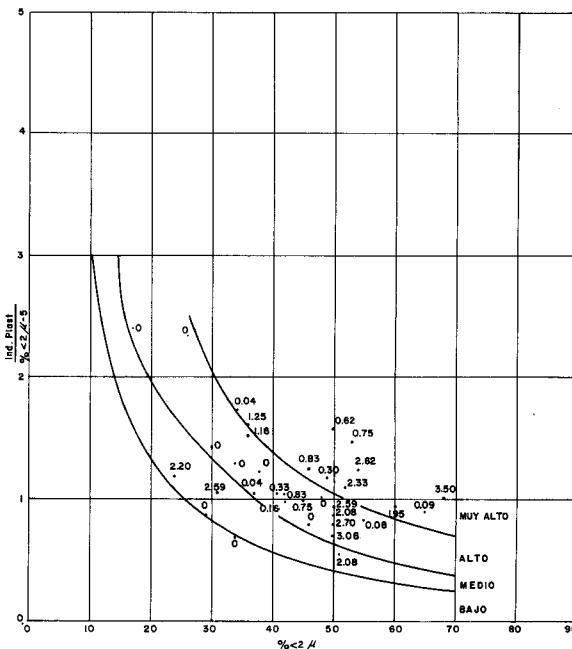


Fig. 23

Correlación entre actividad y potencial de hinchamiento de suelos arcillosos de Madrid (Criterio de Seed y col., 1962). (Se señalan los valores de hinchamiento libres medidos).

El resultado ha sido muy desigual, en conjunto negativo en cuanto a su capacidad cuantificadora de la expansividad del suelo. Sin embargo, alguna de estas correlaciones ha demostrado su utilidad en la estimación del *rriesgo expansivo potencial* de formaciones litológicas con escaso número de ensayos, así como para valorar sus alternativas y poder relacionarlas con las de grupos similares (Figs. 24 y 25).

Con parámetros similares a los de VIYAY-VERGIYA y GHAZZALY, OTEO (1986) ha deducido un nuevo criterio, a partir de los datos de suelos españoles, aunque debe de utilizarse con cuidado, por no haberse contrastado suficientemente (Fig. 26).

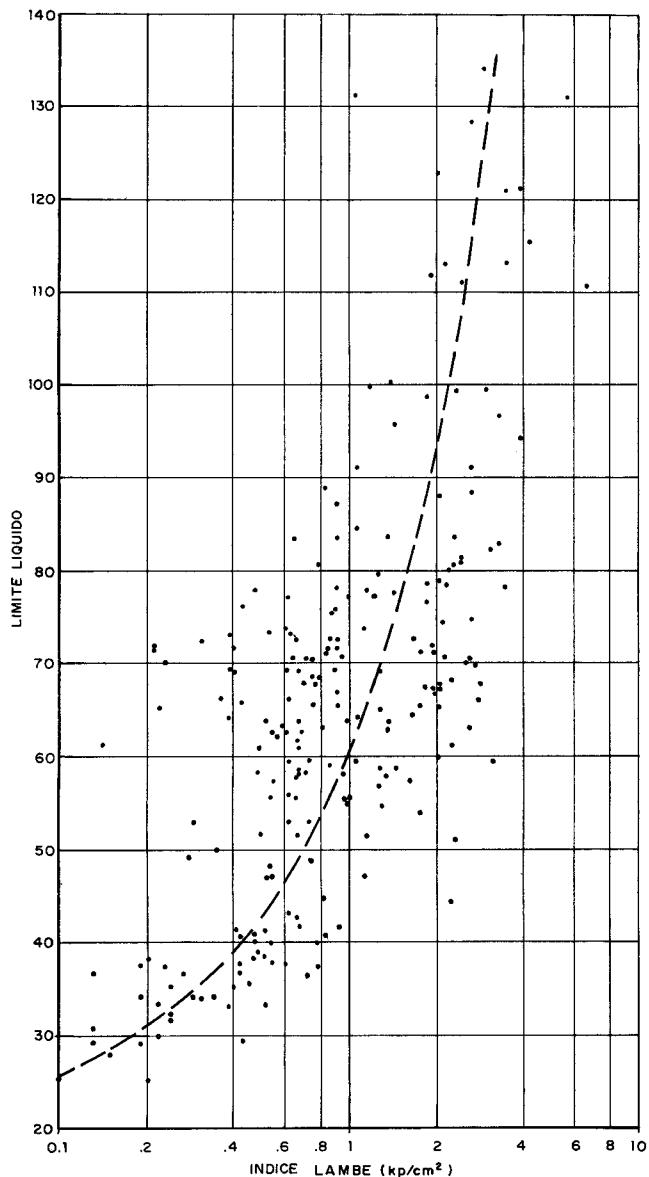


Fig. 24.—Correlación entre el límite líquido y el índice Lambe de suelos procedentes del entorno de la Ciudad de Madrid.

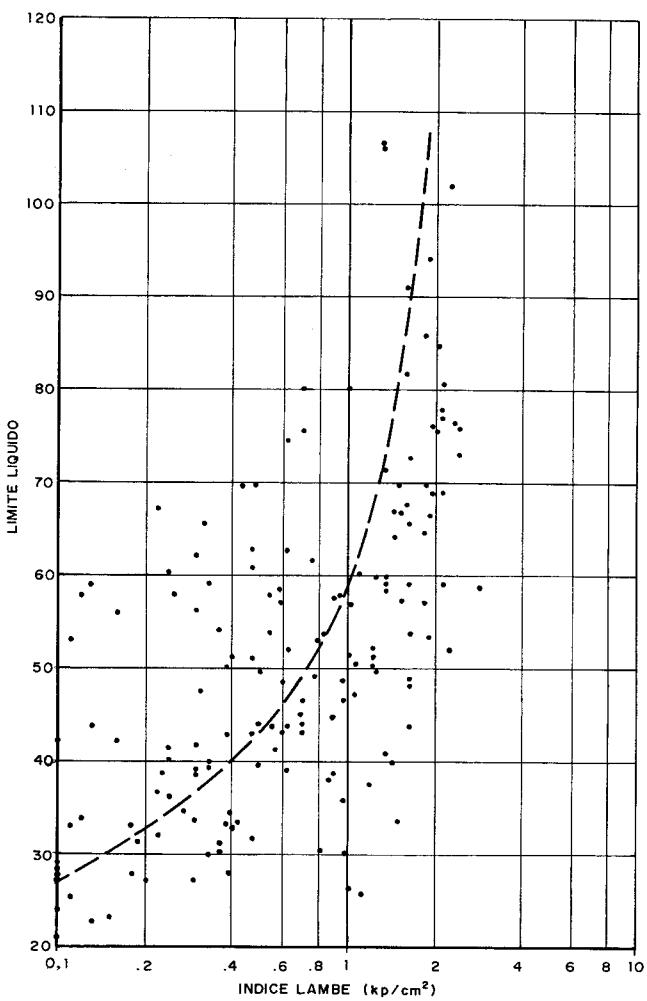


Fig. 25.—Correlación entre el límite líquido y el índice Lambe de suelos procedentes de la franja andaluza.

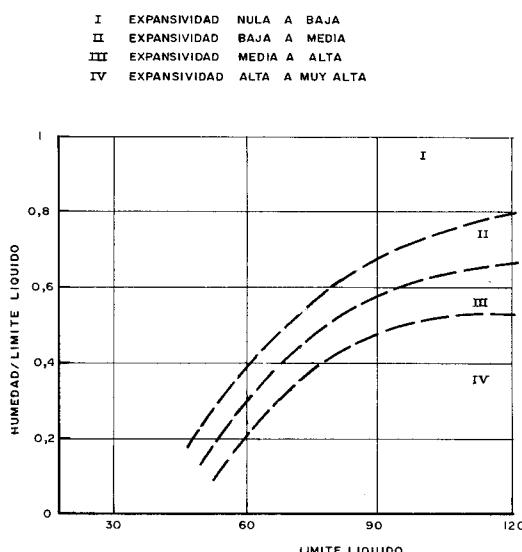


Fig. 26.—Criterio recomendado por Oteo (1986) en base a datos de expansividad españoles.

7.3 Índices y criterios de clasificación utilizados. Aportaciones

7.3.1 Criterios climáticos

Puesto que la expansividad se manifiesta en condiciones de humedad muy contrastadas, es necesario tener en cuenta las alternativas estacionales.

Las zonas con precipitaciones deficitarias en alguna época del año se han diferenciado mediante el *índice de Thornthwaite*.

7.3.2 Criterios mineralógicos y texturales

El potencial expansivo de las arcillas depende de su *naturaleza mineralógica*. La máxima peligrosidad procede de la *montmorillonita*, aunque otros minerales tienen también propiedades expansivas. Se ha tratado de identificar las formaciones arcillosas montmorilloníticas en los suelos españoles.

El criterio mineralógico se ha complementado diferenciando la naturaleza general de la matriz no arcillosa del suelo, y a veces su carácter *detrítico* o *autógeno*.

Se ha encontrado, en este sentido, que la presencia de carbonatos disminuye la capacidad expansiva del suelo. Esta propiedad es muy conocida, y de hecho en ella se basa la estabilización de suelos mediante cal. La relación obtenida, valorada mediante el *ensayo de expansión de Lambe*, es la siguiente:

Índice Lambe máximo (Kp/cm^2)	% Carbonatos máximo
0.8	65
1.5	45
2.3	35

Es de esperar que otras sales cárnicas, como las yesíferas, tengan también un efecto corrector en las propiedades expansivas de las arcillas.

Entre las *características texturales* del suelo se ha tenido en cuenta si era más probable que la arcilla se encontrara diseminada en su matriz (caso de los sedimentos detriticos) o concentrada en dominios espacialmente continuos.

Puesto que el trabajo realizado recoge suelos consolidados, hay que pensar que el empaquetamiento denso conlleva enlaces y microestructuras en sentido amplio comparables para formaciones con una misma historia geológica. Este criterio se ha tenido en cuenta para la equiparación de unidades litológicas.

7.3.3 Índices de plasticidad

De acuerdo con las correlaciones estadísticas desarrolladas por diversos autores, y las obtenidas para este trabajo, el carácter expan-

sivo de los suelos se refleja en su plasticidad. Esta relación no es concluyente, pero resulta interesante considerarla teniendo en cuenta la frecuente disponibilidad existente de ensayos de plasticidad en los estudio geotécnicos.

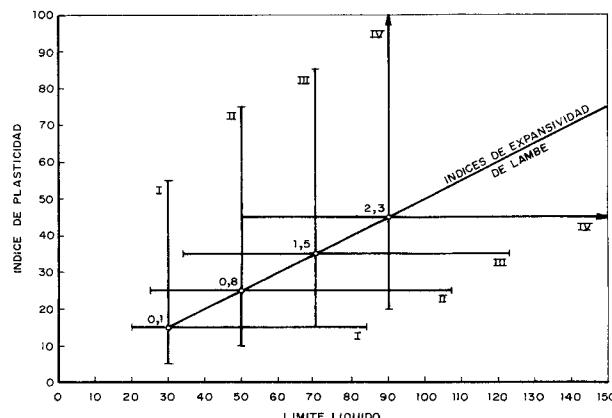


Fig. 27.—Distribución de la plasticidad de suelos españoles para índices Lambe característicos.

La figura 27 recoge el rango de plasticidades de suelos españoles para índices de expansividad de Lambe característicos. Puede comprobarse en ella la frecuente superposición de límites para un mismo grado de expansividad, pero sus valores extremos y medios se van incrementando con la misma. Es posible, por ello, obtener alguna información de la expansividad presumible del suelo analizado sus características plásticas. Y es útil clasificar el potencial expansivo en 4 grados, pues estos son los escalones habituales en las clasificaciones de expansividad. Considerando el límite líquido los índices de referencia serían los siguientes:

Límites líquidos medios Expansividad presumible

< 45	Nula o baja
45 – 65	Moderada
65 – 90	Alta
> 90	Muy alta

Estos valores medios resultan ser, sin embargo, poco conservadores, pues una importante proporción de suelos tiene realmente una expansividad superior a la deducida.

Contrastando los valores del límite líquido con un mayor número de índices cuantificadores de la expansividad del suelo, se ha encontrado que resulta más próximo a la realidad utilizar los siguientes intervalos para valorar el riesgo de expansividad de una formación arcillosa (donde, como es lógico, coexisten arcillas de diferente plasticidad):

Límites líquidos medios	Límites líquidos extremos	Expansividad presumible
	Mínimo	Máximo
< 35	< 20	< 50
35 - 50	20 - 30	50 - 70
50 - 65	30 - 40	70 - 90
> 65	> 40	> 90

Nula o baja
Moderada
Alta
Muy alta

7.3.4 Indices de expansividad de Lambe

Lambe (1960) clasificó los *cambios potenciales de volumen* (PVC) obtenidos en su ensayo de expansión, en 4 categorías. Los valores del PVC del suelo vienen dados por el *índice de expansividad* en su intersección con la curva patrón correspondiente al *estado inicial* de la muestra antes de ser compactada. Si se parte de unas mismas condiciones de humedad, como normalmente sucede, es posible referirse directamente al índice de expansividad como dato inmediato para definir el potencial expansivo del suelo.

En este supuesto, el valor en Kp/cm^2 obtenido directamente en el ensayo, que abreviadamente puede designarse como *índice Lambe*, adquiere el siguiente significado:

Índice Lambe (Kp/cm^2) (*)	Expansividad equivalente
< 0,8	No crítica
0,8 - 1,5	Marginal
1,5 - 2,3	Critica
> 2,3	Muy critica

(*) Condiciones de partida húmedas o secas

7.3.5 Indices representativos del hinchamiento libre

Se ha optado por recoger los escalones utilizados por VIJAYVERGIYA y GHAZZALY (1973):

% Hinchamiento probable	Expansividad
< 1	Baja
1 - 4	Media
4 - 10	Alta
> 10	Muy alta

7.3.6 Indices representativos de la presión de hinchamiento

Como índices de expansividad basados en la presión de hinchamiento se han utilizado los recogidos por CUELLAR (1978):

Presión de hinchamiento (Kp/cm^2)	Expansividad
< 0,25	Baja
0,25 - 1,25	Media
1,25 - 3,00	Alta
> 3,00	Muy alta

7.3.7 Otros índices

La amplia dispersión obtenida de las correlaciones resultantes de comparar, de una parte, parámetros habituales en la identificación geotécnica de suelos y determinación de estado y, de otra, ensayos específicos de expansividad, desaconsejó utilizarlas como índices cuantitativos del potencial expansivo. Sin embargo, con carácter orientativo algunas de ellas han demostrado poder suministrar una valiosa información respecto al rango de expansividad presumible del suelo.

Para valorar la incidencia de la *humedad natural* en la capacidad expansiva del suelo se analizó el comportamiento de 176 muestras de suelos consolidados procedentes de diferentes zonas españolas, aunque con predominio de las pertenecientes al Mioceno madrileño. Agrupados por rangos de expansividad en función del hinchamiento libre, las plasticidades medias, dentro de cada grupo, quedaron comprendidas entre 46 y 49 para los límites líquidos y entre 24 y 26 para los índices de plasticidad. En estas condiciones, el contenido de humedad resultó determinante del hinchamiento libre alcanzado:

% Humedad natural media inicial	% Hinchamiento libre
22	< 1
19	1 - 4
16	4 - 10
13	> 10

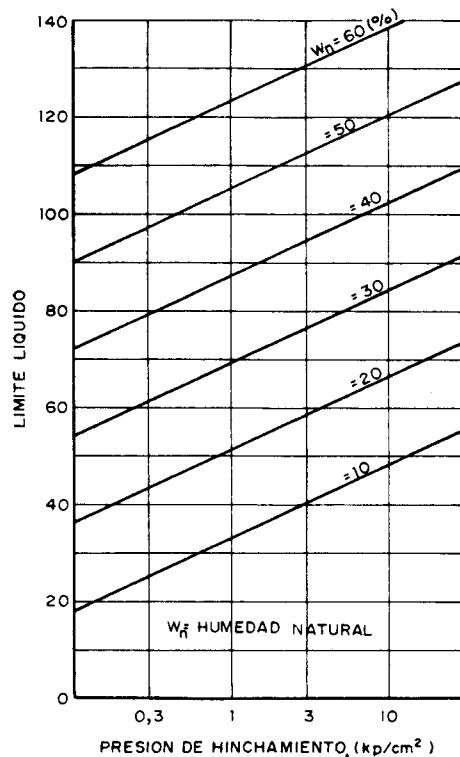


Fig. 28.—Correlación entre L.L. y P.H. en función de la humedad natural para los suelos españoles (confianza: 90% de resultados en el intervalo $\pm 5\%$ de las humedades representadas).

La figura 28 recoge la más satisfactoria de las correlaciones resultantes de relacionar *plasticidad y humedad del suelo* con su capacidad de hinchamiento. El estudio comparativo se realizó con 110 muestras inalteradas procedentes de suelos consolidados, sin discriminación de origen, aunque en una amplia mayoría pertenecientes al Mioceno peninsular (Estos suelos son, por otra parte, los de mayor conflictividad en cuanto a su potencial expansivo). El gráfico debe utilizarse con precauciones. La correlación tienen una confianza estadística del 90 % en el intervalo de $\pm 5\%$ de cada humedad natural representada, pero, dado el carácter similogarítmico del gráfico, al considerar un determinado caso puede haber una importante variación en la estimación de la presión de hinchamiento.

7.4 Criterios de actuación

En el apartado anterior se ha analizado el significado de los distintos índices y ensayos de expansividad con aplicación a suelos españoles. Puesto que el grado de expansividad se clasifica generalmente en 4 categorías, es lógico que la valoración del riesgo expansivo se realice también en 4 grupos, y así se ha hecho al elaborar el *Mapa Previsor de Riesgos*. De esta manera puede relacionarse, hasta cierto punto, la capacidad expansiva global de unos mismos tipos de suelos, evaluada mediante ensayos, con la de la formación litológica de procedencia.

Por ello, los grados de expansividad establecidos fueron los siguientes:

- I. *Potencialidad expansiva del suelo nula a baja*
- II. *Potencialidad expansiva del suelo baja a moderada*
- III. *Potencialidad expansiva del suelo moderada a alta*
- IV. *Potencialidad expansiva del suelo alta a muy alta*

La estimación del grado de expansividad de los suelos de una misma procedencia se realizó, básicamente, de acuerdo con la máxima capacidad expansiva encontrada, la frecuencia con que se ha manifestado y sus alternativas.

Por otra parte, como esa capacidad expansiva está relacionada con las características del suelo (definidas por su composición, textura y estructura), el grado de expansividad puede ser globalizado para formaciones arcillosas de características similares. Estas formaciones, agrupadas en función de su edad geológica y de la litología, se clasificaron, a efectos prácticos, en las siguientes *unidades cronolitológicas*:

<i>Edad geológica</i>	I. Neógeno	Cenozoico
	II. Paleógeno	
	III. Mesozoico	
	IV. Paleozoico	
<i>Litología</i>	a. Arcillas masivas	
	b. Arcillas con limos y arenas, ocasionalmente gravas	
	c. Arcillas con carbonatos	
	d. Arcillas con sulfatos, con o sin carbonatos	
	e. Arcillas con arenas y carbonatos y/o sulfatos	
	f. Arenas, ocasionalmente gravas, con limos y arcillas subordinadas	

Complementariamente, la evaluación del riesgo de expansividad debería tener en cuenta las alternativas climáticas, puesto que si la unidad cronolitológica se encuentra emplazada en una zona climática deficitaria en humedad, su potencial expansivo podrá desarrollarse más fácilmente que si ese déficit no se produce. Estas alternativas se han clasificado mediante el *índice de Thornthwaite*, que establece si una zona es climatológicamente deficitaria en humedad.

La conjunción de todos estos criterios condujo a la siguiente clasificación de la *capacidad expansiva* de los suelos arcillosos, de acuerdo con las 4 categorías anteriormente establecidas:

- I. *Arcillas no expansivas o diseminadas en matriz no arcilloso.*
- II. *Arcillas expansivas subordinadas o emplazadas en zonas climáticas sin déficit anual de humedad.*
- III. *Arcillas expansivas localmente predominantes y emplazadas en zonas climáticas con déficit anual de humedad.*
- IV. *Arcillas expansivas zonalmente predominantes o emplazadas en puntos con problemas derivados de la expansividad.*

La evaluación del grado de expansividad potencial se ha realizado sobre formaciones arcillosas que forman parte del sustrato. Localmente pueden estar enmascaradas por materiales de aportación o desarrollados sobre aquél. Estas formaciones se han clasificado genéricamente como *recubrimientos*.

La característica inmediata de los recubrimientos es una gran variabilidad litológica y textural que impide cualquier intento de valoración global de su potencial expansivo. La naturaleza arcillosa de estos materiales está, en cualquier caso, en conjunto, muy vinculada al clima y a las formaciones litológicas de procedencia, lo que puede suministrar una primera información de la presencia en ellos de arcillas expansivas. Esta dependencia es muy acentuada en los recubrimientos desarrollados «*in situ*» (caso de los *vertisuelos*).

Por otra parte, un elevado porcentaje de estos materiales geológicamente recientes y, en especial y como criterio general, los más arcillosos, han de ser en lo posible evitados, por lo que siempre será útil referir la expansividad a la del sustrato.

7.5 Datos utilizados

7.5.1 Base geológica

La definición y cartografía de las unidades crono-litológicas a escala 1:1.000.000 se ha realizado a partir de los siguientes documentos:

- Cartografía de base por reducción del Mapa Nacional de Síntesis Geológica a escala 1:200.000 del I.G.M.E.
- Confrontación con el Mapa Geotécnico General a escala 1:200.000 del I.G.M.E.
- Revisión con el Mapa Nacional de Rocas Industriales a escala 1:200.000 del I.G.M.E., Mapas Geotécnicos de Ordenación Territorial y Urbana a escalas 1:100.000 y 1:25.000 del I.G.M.E. y Mapa Litológico de España Peninsular e Insular a escala 1:500.000 de Macau y col.

Los datos referentes a la mineralogía, textura y estructura de los suelos arcillosos se han obtenido en gran parte de la información contenida en las correspondientes Memorias. También se han manejado datos puntuales de otras procedencias, y algunos que se han investigado específicamente para este trabajo.

7.5.2 Base geotécnica

Puede resumirse como sigue:

- Memorias de Mapas Geotécnicos Generales, Mapas Geotécnicos de Ordenación Territorial y Urbana, Estudios Previos de Terrenos para Autopistas y estudios geotécnicos sectoriales procedentes de informes geotécnicos,

trabajos de investigación o referencias a actuaciones concretas. El alcance de estas actuaciones fue, en gran parte, canalizado mediante una encuesta remitida a los Laboratorios Homologados de Ensayos de Mecánica del Suelo. La revisión y análisis comparativo de las conclusiones contenidas en esos estudios ha permitido una aproximación, en ocasiones muy concretas, a los problemas de expansividad vinculados a zonas y formaciones litológicas específicas.

— Ensayos de plasticidad y expansividad procedentes de informes realizados por entidades públicas (principalmente del Laboratorio de Carreteras y Geotécnica «José Luis Escario» del CEDEX) y privadas, además de algunos obtenidos para este trabajo.

En total se ha manejado el siguiente número de ensayos, desglosados por zonas de procedencia:

Procedencia	Ensayos de plasticidad	Ensayos de expansividad
Cornisa Cantábrica	95	8
Cuenca del Ebro	35	63
Franja extremeña	316	44
Meseta Norte	230	48
Meseta Sur	351	694
Franja levantina	421	66
Franja andaluza	325	466

La distribución de ensayos disponibles ha sido muy variable. Esta dispersión está justificada por la presión constructiva en la zona, pero también por el riesgo de expansividad secularmente presumible en ella. Es por ello que el número de ensayos disponibles se incrementa, en buena parte, para las formaciones con un elevado riesgo de expansividad contrastado por la experiencia.

7.6 Significado de la clasificación realizada

La adscripción de un grado de expansividad para una determinada formación litológica no la supone, como es lógico, para todos los términos arcillosos que la integran. Existen alternativas de la misma, puesto que los materiales geológicos no suelen ser ni espacial ni temporalmente continuos al nivel de escala de trabajo desarrollado (Fig. 29). Por otra parte, pueden existir también *microclimas* locales que alteren las condiciones climáticas regionales.

Así como en una unidad clasificada como poco o nada expansiva no son de prever riesgos derivados de la expansividad, en el caso de unidades de *máximo riesgo* es posible la presencia de horizontes de baja expansividad.

MINERALES	PROPORCIÓN				
	PREDOMINANTE	ABUNDANTE	MODERADA	ESCASA	INDICIOS O NULA
CAOLINITA				- - -	- - -
ILLITA	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
MONTMORILLONITA	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
CLORITA			- - -	- - -	- - -
SEPIOLITA O ATAPULGITA			- - -	- - -	- - -

— "PEÑUELAS ARCILLOSAS" DE LA MESETA SUR
 - - - "MARGAS AZULES" DEL GUADALQUIVIR

Fig. 29.—Alternativas de composición en las arcillas de dos formaciones con expansividad.

Como ejemplo, la Fig. 30, ilustra las alternativas expansivas de las arcillas miocenas de Madrid, formaciones que han sido muy estudiadas por los problemas de expansividad que plantean.

Los gráficos muestran la frecuencia obtenida en intervalos acumulados del 10 %, de resultados que superan los valores que definen. Como puede constatarse, el porcentaje de muestras

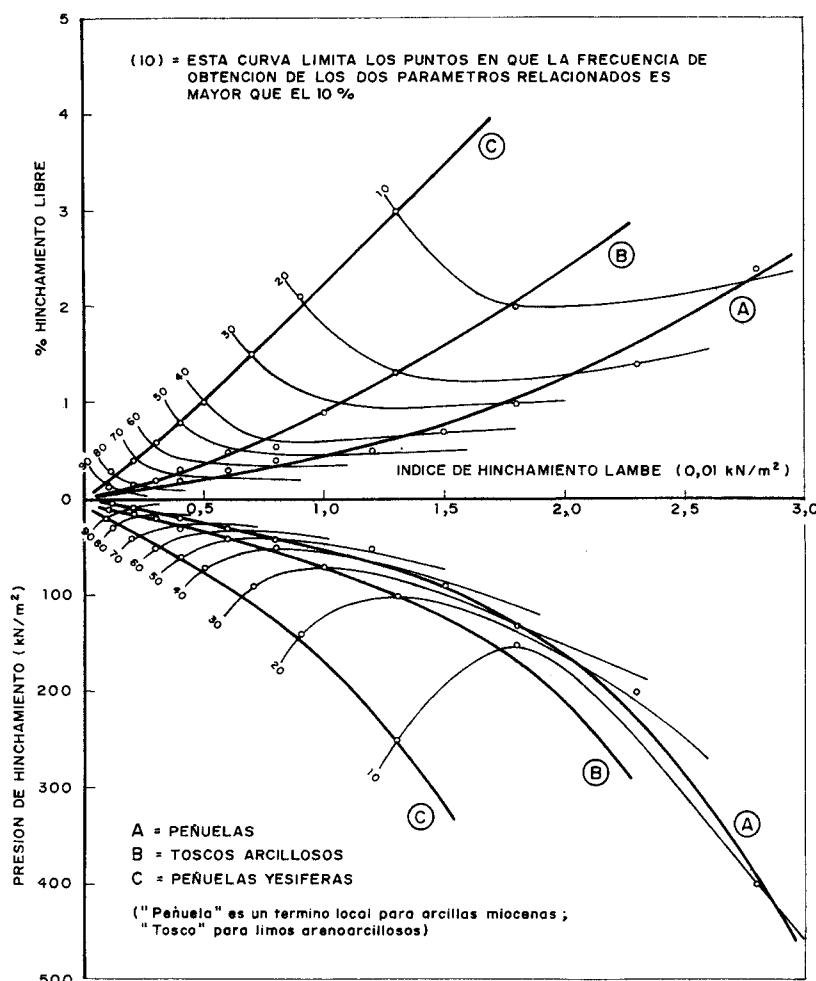


Fig. 30 Distribución de resultados correspondientes a ensayos de expansividad para suelos de Madrid.

con valores elevados de expansividad es minoritario.

Sin embargo, puesto que se trataba de elaborar un mapa previsor de riesgos por arcillas expansivas, habían de ser destacadas aquellas formaciones litológicas que las contenían en proporción significativa, y que se encontraban, por las características climáticas, en condiciones de manifestarse.

En la definición final del *grado de peligrosidad* de la unidad cronolitológica se llegó a un compromiso entre lo que podría denominarse el «riesgo medio» de expansividad de la formación y el «riesgo máximo», para evitar valoraciones en exceso o poco conservadoras. El «riesgo medio» se adoptó en unidades con arcillas expansivas subordinadas en toda la formación, pero fue necesario aceptar el «riesgo máximo» si esas arcillas llegaban a ser en algún momento predominantes y, desde luego, si se habían descrito problemas de expansividad. Al mismo tiempo, esta valoración intrínseca a la *unidad cronolitológica* fue contrastada con factores climáticos.

Dentro de cada grupo con expansividad potencial semejante cabría esperar una capacidad expansiva máxima, en la mayor parte de los casos, que puede orientativamente valorarse como sigue:

Grado de expansividad	Presión de hinchamiento máxima presumible (Kp/cm^2)	Hinchamiento libre máximo presumible %
I	< 0.25	< 1
II	0.25 - 1.25	1 - 4
III	1.25 - 3.00	4 - 10
IV	> 3.00	> 10

Sin embargo, en la clasificación finalmente realizada se ha tenido en cuenta si los suelos se encontraban en zonas climáticas sin déficit anual de humedad. En ese caso, el grado de expansividad máximo presumible se disminuyó como criterio práctico general un escalón respecto al de unidades cronolitológicas similares, pero sujetas a inversiones estacionales de humedad. Teóricamente, pues, y en condiciones atípicas, podrían alcanzarse en esas formaciones valores de expansividad superiores a las reseñadas.

Como síntesis de criterios, se pasará revista a las alternativas básicas que pueden caracterizar los distintos grados de expansividad potencial de las unidades cronolitológicas, y que representan, en definitiva, el *riesgo de expansividad* de las mismas:

I. *Potencialidad expansiva de los suelos nula a baja*: Características litológicas y/o climáticas

desvinculadas de problemas de expansividad. Parámetros definidores:

- Mineralogía poco o nada montmorillonítica
- Arcillas texturalmente diseminadas
- Edad geológica antigua a reciente
- Climatología subhúmeda-perhúmeda
- Plasticidades bajas
- Ensayos de expansividad con valores bajos o nulos

II. *Potencialidad expansiva de los suelos baja a moderada*: Características litológicas y/o climáticas donde normalmente no deben producirse problemas de expansividad. Parámetros definidores:

- Mineralogía algo montmorillonítica.
- Arcillas mayoritariamente diseminadas
- Edad geológica antigua a reciente
- Climatología subhúmeda-húmeda
- Plasticidades máximas de tipo medio
- Ensayos de expansividad con valores máximos medios

III. *Potencialidad expansiva de los suelos moderada a alta*: Características litológicas y climáticas que pueden producir problemas de expansividad, sin que se hayan localizado referencias a ellos. Parámetros definidores:

- Mineralogía frecuentemente montmorillonítica.
- Arcillas en tramos continuos
- Edad geológica media a reciente
- Climatología árida-seca
- Plasticidades máximas de medias a altas
- Ensayos de expansividad máximos altos

IV. *Potencialidad expansiva de los suelos alta a muy alta*: Características litológicas y climáticas que determinan problemas de expansividad. Parámetros definidores:

- Mineralogía globalmente montmorillonítica
- Arcillas muy montmorilloníticas en tramos continuos
- Edad geológica reciente
- Climatología semiárida-subhúmeda
- Plasticidades que pueden ser muy altas
- Ensayos de expansividad frecuentemente altos

El resultado finalmente obtenido se ha plasmado en el Mapa de España, a escala 1:1.000.000, al que acompaña esta Memoria. El *riesgo de expansividad* (dado por el potencial expansivo presumible) se indica mediante diferentes colores y, en cada caso, se señala a qué unidad cronolitológica pertenece la formación arcillosa cartografiada.

7.7 Unidades cronolitológicas en los sustratos arcillosos españoles

Los sustratos arcillosos de tipo IV (paleozóicos) están escasamente representados en España. Los existentes corresponden a los litotipos b y e.

Entre los sustratos arcillosos *mesozoicos* (tipo *III*) son importantes los de facies *Keuper*, de edad triásica. Cabe clasificarlos como unidades cronolitolíticas de tipo *III_d*, puesto que se trata de arcillas en gran parte calco-yesíferas. Alternativamente, las arcillas triásicas con fracción detrítica se clasifican como unidades de tipo *III_e*.

Las litologías arcillosas de edad jurásica son en general margosas y se integran, por consiguiente, en unidades cronolitolíticas de tipo *III_c*.

Las arcillas de edad cretácica corresponden a facies más diversas. Predominan las litologías mixtas (tipo *e*), aunque existen también arcillas margosas (tipo *c*) y arcillas únicamente con materiales detríticos (clasificadas como de tipo *b*). Esporádicamente se encuentran arcillas yesíferas cretácicas, agrupadas en unidades cronolitolíticas de tipo *III_c*.

Los sustratos arcillosos *paleógenos* (eocenos y oligocenos) se agrupan en unidades cronológicas de tipo *II*. Sus alternativas litológicas son amplias, aunque predominan las formaciones de tipo *b* y *e*, puesto que los materiales detríticos suelen ser muy significativos.

Finalmente, los sustratos arcillosos de tipo *I*, *neógenos* (miocenos y pliocenos), requieren, por su extensión y por su capacidad expansiva con frecuencia elevada, un análisis más pormenorizado. Los materiales que acompañan a las arcillas pueden ser muy diversos, por lo que están representados todos los tipos litológicos.

Por su extensión y/o conflictividad cabe referirse a las siguientes formaciones arcillosas neógenas:

- Arcillas de la *franja cantábrica*. Litotipos *b* y *d* (Escasamente representados).
- Arcillas de la *cuenca del Ebro*. Litotipos *d* y *e*.
- Arcillas de la *franja extremeña*. Litotipos *b* y *e*.
- Arcillas de la *Meseta Norte*. Litotipos *b*, *d* y *e*.
- Arcillas de la *Meseta Sur*. Litotipos *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, y *f*.
- Arcillas de la *franja levantina*. Litotipos *c* y *e*.
- Arcillas de la *franja andaluza*. Litotipos *b*, *c*, *e* y *f*.

7.8 Riesgo de expansividad de las unidades cronolitolíticas

Desde un punto de vista cronológico, la capacidad expansiva de los litotipos arcillosos se incrementa, globalmente, de los de tipo *IV* (*paleozóicos*) a los de tipo *I* (*neógenos*). Se exceptúan algunas formaciones arcillosas de edad triásica (unidad cronológica *III*), de elevado potencial expansivo.

A igualdad de otras condiciones, la menor potencialidad expansiva corresponde a las facies sedimentarias muy detriticas y, en parte, a las mixtas (unidades litológicas *f* y *e*, respectivamente). Las formaciones arcillosas de tipo *b* pueden presentar horizontes con un considerable riesgo de expansividad. Las texturas arcillosas masivas (tipo *a*) confieren, si se trata de formaciones montmorilloríticas, una capacidad expansiva muy alta. Por último, en las unidades litológicas arcillosas con carbonatos y/o sulfatos (tipos *c* y *d*), aunque la presencia de sales cárnicas límite, de forma puntual, la capacidad expansiva del suelo, no incide en muchas ocasiones en la de su conjunto. Esta circunstancia se explica porque las condiciones sedimentológicas más habituales en la formación de este tipo de suelos presentan alternativas que determinan frecuentemente la aparición de niveles muy arcillosos interestratificados con las facies calcáreas y yesíferas, y estos niveles pueden ser, además, muy montmorilloníticos (Así, se han producido hinchamientos muy importantes en las provincias de Madrid y Tarragona en margas yesíferas con niveles montmorilloníticos interestratificados).

En resumen, las litologías de *mayor riesgo de expansividad* corresponden a las de tipo *a*, *c* y *d*. Las de tipo *b* y *e* pueden presentar horizontes muy arcillosos. Finalmente, las de tipo *f*, poco arcillosas en general, tienen presumiblemente escasa o nula capacidad expansiva. La mayor potencialidad expansiva, por contener arcillas muy montmorilloníticas, corresponde a sustratos de tipo *I*, en menor medida a los de tipo *II* y a algunos de tipo *III*.

8. ANALISIS COMPARATIVO DEL RIESGO DE EXPANSIVIDAD EN LOS DIFERENTES AMBITOS TERRITORIALES ESPAÑOLES

La distribución de suelos potencialmente expansivos en España es irregular, como corresponde a una litología, historia geológica y climatología muy desiguales (este hecho es fácilmente advertible examinando el mapa a escala 1:1.000.000 adjunto). Sin embargo, el riesgo de expansividad se incrementa, globalmente, en dirección N.-S. Ello es consecuencia de una climatología en conjunto más árida y, en términos generales, de un predominio mayor de suelos montmorilloníticos en la mitad Sur peninsular.

Estas circunstancias se ponen de manifiesto en la Tabla VI, que resume, porcentualmente, el riesgo de expansividad en los diferentes ámbitos territoriales españoles, teniendo en cuenta la naturaleza del sustrato y las condiciones climáticas.

Las alternativas posibles, incluso dentro de cada ámbito territorial, son numerosas, según se analizará para cada zona de actuación:

TABLA VI
DISTRIBUCION PORCENTUAL DE LOS SUELOS EXPANSIVOS EN ESPAÑA

AMBITOS TERRITORIALES	RIESGO DE EXPANSIVIDAD DEL SUSTRATO ARCILLOSO (% DEL TOTAL)			
	NULO A BAJO	BAJO A MODERADO	MODERADO A ALTO	ALTO A MUY ALTO
CORNISA CANTABRICA	15,1	84,9	0,0	0,0
CUENCA DEL EBRO	8,4	61,9	29,7	0,0
FRANJA EXTREMEÑA	1,0	62,6	36,4	0,0
MESETA NORTE	6,5	73,9	19,6	0,0
MESETA SUR	12,3	66,5	15,7	5,5
FRANJA LEVANTINA	5,5	80,0	10,9	3,6
FRANJA ANDALUZA	5,1	39,3	24,5	31,1
TOTAL DEL TERRITORIO	7,4	64,2	21,3	7,1

Cornisa cantábrica

Se han referenciado, junto a formaciones arcillosas poco plásticas, algunas con *límites líquidos* que alcanzan valores superiores a 50. No obstante, los datos disponibles señalan *índices Lambe* moderados para esos suelos, con cambios potenciales de volumen de tipo no crítico o marginal. Los ensayos de *hinchamiento libre* analizados indican, asimismo, una expansividad media o baja.

No existe, en cualquier caso, déficit anual de humedad que permita, en circunstancias normales, el desarrollo de alternativas estacionales cíclicas.

El hecho de no haberse descrito problemas de expansividad en la zona justifica la no conflictividad del territorio, reflejada, a su vez, en la escasez de ensayos de expansividad existentes.

Cuenca del Ebro

Los *límites líquidos* recopilados oscilaron entre 20 y 70, con un predominio estadístico hacia los valores de 30-50. Los *índices de plasticidad* se situaron mayoritariamente en el intervalo 10-30.

Los ensayos de *hinchamiento Lambe* analizados reflejan el carácter plástico moderado de la mayor parte de las formaciones arcillosas, puesto que se obtienen valores de expansión clasificables como no críticos o marginables.

Sin embargo, el riesgo de expansividad puede ser superior al que podría deducirse de los datos anteriores. Se han ensayado suelos con un *hinchamiento libre* de hasta un 15% y *presiones de hinchamiento* próximas a 4 Kp/cm², aunque se trata de valores puntuales.

Unas condiciones climáticas con frecuencia de sensible aridez pueden permitir el desarrollo del potencial expansivo de los suelos.

Franja extremeña

El total de sustratos arcillosos cartografiados alcanza 13.567 km² (el 20,8% de la extensión del ámbito territorial). Las formaciones arcillosas más significativas se encuentran hacia Badajoz, y bajo condiciones climáticas de aridez.

El rango de plasticidades mayoritario encontrado osciló entre 20 y 80 para los *límites líquidos* y 10 y 40 para los *índices de plasticidad*. Los valores predominantes estuvieron comprendidos, respectivamente, entre 30-50 y 20-30.

Los valores resultantes del ensayo de *Lambe* señalan una amplia dispersión, puesto que se obtuvieron, aún teniendo en cuenta el corto número de ensayos disponibles, cambios potenciales de volumen de no críticos a muy críticos. No obstante, los ensayos de *presión de hinchamiento* analizados indican una expansividad máxima más moderada, de tipo medio. Ocasionalmente, sin embargo, el potencial expansivo podría ser alto.

Meseta Norte

Las plasticidades recogidas oscilaron entre 10 y 70 en cuanto a los valores del *límite líquido* (con un predominio en el intervalo 25-45), y entre 5 y 50 para los valores del *índice de plasticidad* (con frecuencia máxima en el intervalo 10-25).

Con ese rango de plasticidades mayoritarias, la capacidad expansiva presumible de los suelos debería ser, considerada en conjunto, baja a moderada. De hecho, los cambios potenciales de volumen obtenidos en el ensayo de Lambe son de tipo no crítico o marginal en los ensayos recopilados.

Sin embargo, los *ensayos cuantitativos* de expansividad indican a veces valores elevados. La mayor incidencia se produciría hacia la comarca de «Tierra de Campos», donde existen horizontes arcillosos de alta capacidad expansiva, encontrándose, además, en condiciones climáticas deficitarias de humedad.

Meseta Sur

Los sustratos arcillosos cartografiados representan el 37,8% del total del territorio, de los que un 76% corresponden a sedimentos neógenos (unos 25.127 km²). El rango de plasticidades encontrado para las formaciones arcillosas es muy amplio, con *límites líquidos* comprendidos entre 20 y 150, incluso superiores (se ha contabilizado un límite líquido extremo de 290 sobre 664 ensayos contrastados), como puede verse en la Fig. 31. Los *índices de plasticidad* oscilaron entre 5 y 100, a veces también superiores. La mayor frecuencia en cuanto a los *valores del límite líquido* se produjo en el intervalo 50-80, en el 20-40 para los de *índice de plasticidad* (Fig. 32). Las *humedades naturales* encontradas sobre 569 muestras estuvieron mayoritariamente comprendidas entre el 10 y 50%, con máxima frecuencia en el intervalo 20-35% (Fig. 33).

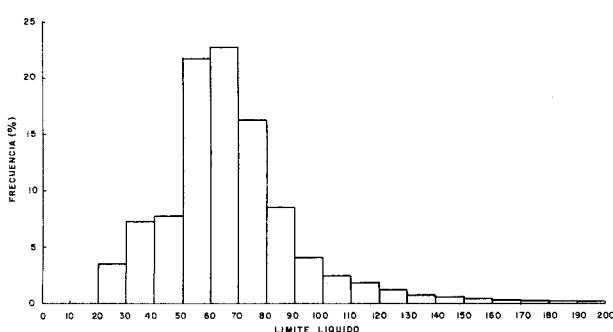


Fig. 31.—Distribución de los límites líquidos de los suelos de la Meseta Sur.

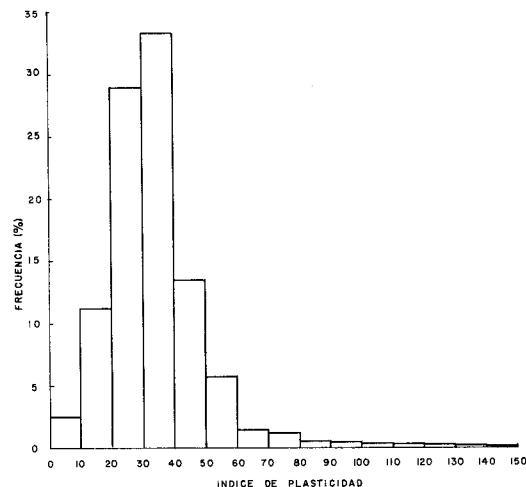


Fig. 32.—Distribución de los índices de plasticidad de los suelos de la Meseta Sur.

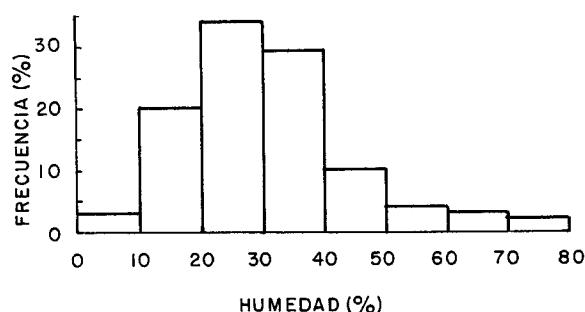


Fig. 33.—Distribución de las humedades naturales de los suelos de la Meseta Sur.

Los cambios potenciales de volumen correspondientes a los *índices Lambe* mostraron la siguiente distribución (282 muestras):

PVC	% RESULTADOS ENSAYOS LAMBE
No crítico	46,8
Marginal	27,0
Crítico	13,8
Muy crítico	12,4

En cuanto a la distribución de los valores obtenidos con *ensayos cuantitativos* de expansividad, puede resumirse como sigue:

GRADO DE EXPANSIVIDAD PRESUMIBLE	PORCENTAJE DE MUESTRAS HINCHAMIENTO LIBRE (161 muestras)	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (259 muestras)
Bajo	65,2	25,9
Medio	28,0	47,5
Alto	5,6	16,2
Muy alto	1,2	10,4

Los valores máximos recopilados fueron los siguientes: *Índice Lambe*, 7 kp/cm²; *hinchamiento libre*, 11%; *presión de hinchamiento*, 23 kp/cm².

Según se desprende de las alternativas encontradas, predominan los suelos con capacidad expansiva moderada o baja, y ello incluso considerando que existe una selección previa en las muestras que se ensayan, que corresponden normalmente a suelos en los que se presume un riesgo de expansividad.

Existe, sin embargo, una importante proporción de muestras con una elevada capacidad de hinchamiento. Esta característica justifica el término de «expansivas» que se viene adjudicando, globalmente, a algunas formaciones litológicas que contienen suelos muy expansi-

vos, circunstancia magnificada por haber sido la causa de problemas geotécnicos.

Sucede realmente que algunas series sedimentarias (como las que integran gran parte del entorno de la ciudad de Madrid, conocidas localmente como «peñuelas» y «toscos»), presentan horizontes muy montmorilloníticos y expansivos interestratificados en otros términos que lo son menos o nada, y esas son las alternativas que reflejan los ensayos de expansividad. Las Figs. 34 y 35 muestran las granulometrías habituales de aquellas dos formaciones madrileñas.

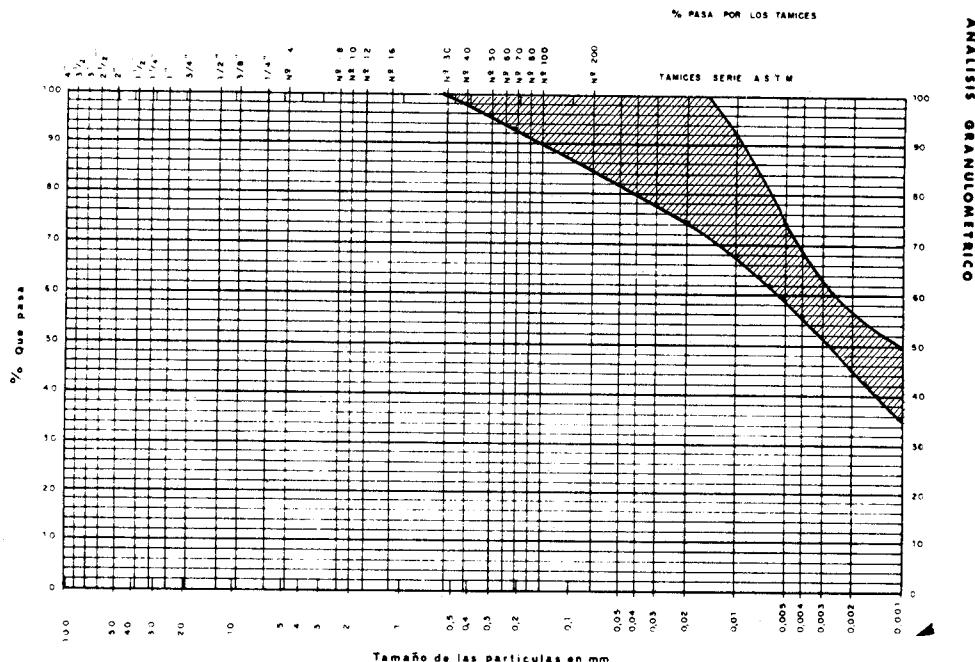


Fig. 34.—Huso granulométrico representativo del tosco arcilloso (Fuente, 1984).

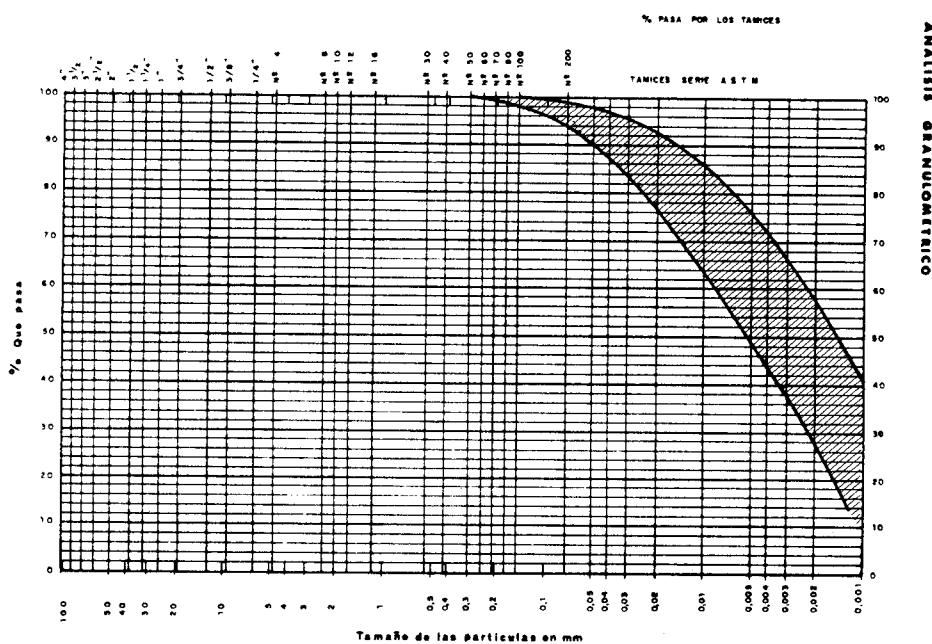


Fig. 35.—Huso granulométrico de algunas peñuelas (Oteo y Fernández, 1978).

A esta capacidad expansiva, elevada en ocasiones, se unen unas condiciones climáticas predominantemente deficitarias en humedad, por lo que el riesgo expansivo se maximaliza.

Franja levantina

Climatológicamente se trata de una franja territorial con un déficit de humedad mayoritario. Al mismo tiempo, existen formaciones arcillosas con una capacidad expansiva presumiblemente elevada, aunque no son generales.

Se han recogido, en efecto, suelos con *límites líquidos* de 150 e *índices de plasticidad* de 120. Los valores de máxima frecuencia están, no obstante, alejados de aquellos máximos, en el intervalo 30-50 y 10-30, respectivamente.

No se ha conseguido disponer, sin embargo, de un mínimo de ensayos de expansividad suficientemente extendidos para permitir un análisis global de las alternativas de la misma. Los datos a que se ha tenido acceso señalan *índices Lambe* correspondientes a cambios potenciales de volumen no críticos o marginales y *presiones de hinchamiento e hinchamientos libres* que señalan una expansividad generalmente baja o media.

Existen, no obstante, datos referidos a zonas concretas en las que se han citado problemas derivados de la expansividad del suelo. Entre ellas están la franja noroccidental de la isla de Mallorca y el área oriental de Murcia.

Un caso especial lo constituyen los suelos margo-yesíferos del Noroeste de Tarragona. En ensayos a largo plazo se han llegado a medir *presiones de hinchamiento* de 20 Kp/cm², con un *hinchamiento en descarga* del 11,5% (SERRANO y col., 1981).

Franja andaluza

Existen numerosas referencias a arcillas expansivas en los territorios agrupados en la franja andaluza. Además de una capacidad expansiva de los suelos frecuentemente elevada, la climatología predominante, de tipo semihumedo-semiárido, favorece las alternativas estacionales de humedad. En las Islas Canarias, estos suelos están incluidos entre los recubrimientos.

Los afloramientos arcillosos son en Andalucía importantes, puesto que representan el 34,2% del territorio. La mayor parte corresponden a sedimentos geológicamente recientes, postmesozoicos, que alcanzan unos 24.367 km² (incluyendo recubrimientos geológicamente significativos). Estos suelos son con frecuencia muy montmorilloníticos.

Los datos geotécnicos recopilados, referentes en gran parte a las arcillas calcáreas consolidadas del Guadalquivir (*unidad cronolitológica*

ca I_c), señalan las siguientes características (ver además Figs. 36, 37, 38 y 39):

	LÍMITES LIQUIDOS (315 muestras)	ÍNDICES DE PLASTICIDAD (315 muestras)	HUMEDADES NATURALES % (250 muestras)
Valores extremos	20 - 110	5 - 75	10 - 60
Valores medios	50 - 70	25 - 45	15 - 30

PVC % RESULTADOS ENSAYO LAMBE (198 muestras)

No crítico	54,0
Marginal	26,7
Crítico	16,2
Muy crítico	3,1

GRADO DE EXPANSIVIDAD PRESUMIBLE PORCENTAJE DE MUESTRAS HINCHAMIENTO LIBRE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (20 muestras) (127 muestras)

Bajo	25,0	13,4
Medio	40,0	62,2
Alto	30,0	14,2
Muy alto	5,0	10,2

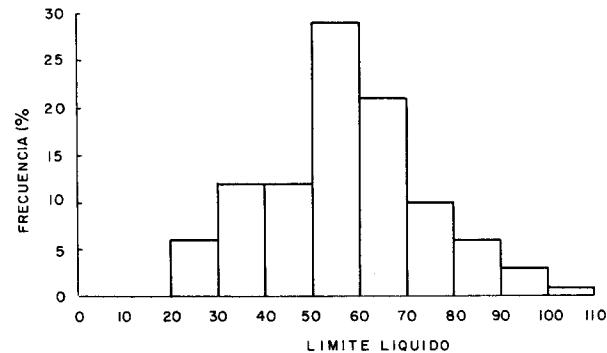


Fig. 36.—Distribución de los límites líquidos de los suelos de la Franja Andaluza.

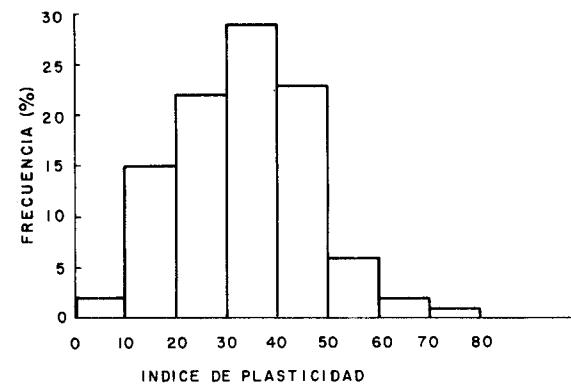


Fig. 37.—Distribución de los índices de plasticidad de los suelos de la Franja Andaluza.

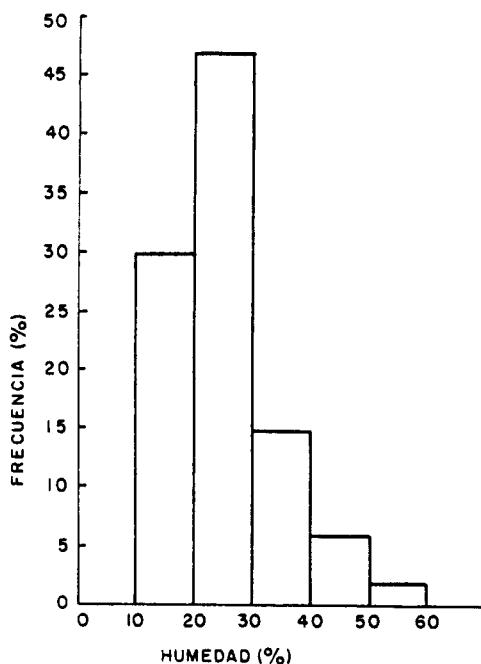


Fig. 38.—Distribución de las humedades naturales de los suelos de la Franja Andaluza.

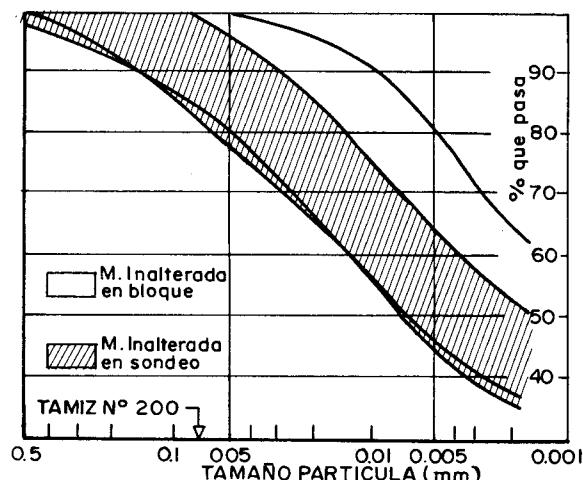


Fig. 39.—Granulometría típica de las «margas azules» del Guadalquivir (Uriel y Oteo, 1976).

Los valores máximos recopilados fueron los siguientes: *índice Lambe*, 3 Kp/cm²; *hinchamiento libre*, 9%; *presión de hinchamiento*, 12 Kp/cm².

Aunque los resultados disponibles señalan una capacidad expansiva estadísticamente minoritaria en sus valores elevados, la proporción de muestras que los alcanzan es importante. Los datos experimentales corroboran la frecuente inestabilidad volumétrica de los suelos, que se refleja en numerosas actuaciones correctoras para subsanar problemas constructivos derivados de la expansividad del suelo: Jaén (capital), Córdoba, Huelva (capital), Málaga, Sevilla, etcétera.

9. SISTEMAS DE CIMENTACIÓN EN ARCILLAS EXPANSIVAS

9.1. Generalidades

Como complemento de todo lo anteriormente expuesto se incluyen, a continuación, los procedimientos más comúnmente empleados en la edificación para cimentar sobre materiales expansivos, con especial referencia a los utilizados en España. No se trata, a continuación, el problema de obras viales por sus especiales características, ni de exponer detalladamente el cálculo de cimentaciones en terrenos expansivos. Ambos aspectos se salen del alcance de la presente Memoria, destinada a describir y cuantificar la expansividad en España.

La expansividad de un terreno —o sea, su cambio de volumen— bajo una cimentación y alrededor de las instalaciones auxiliares puede tener como consecuencia:

- Rotura de saneamientos.
- Defectos en el drenaje periférico.
- Distorsiones en el edificio, con los consiguientes peligros de agrietamiento, etc.

Todos estos incidentes afectan, principalmente, a los edificios de pocas alturas, en que las presiones que transmiten al terreno no son capaces de impedir el hinchamiento de la arcilla. Sin embargo, en algunos casos de edificaciones de altura también se han registrado incidentes en pabellones auxiliares, terrazas, soleas de planta baja, etc.

En la Fig. 40 se ha representado, esquemáticamente, el posible agrietamiento de un edificio de baja altura, cuando se produce un hinchamiento máximo bajo el centro del inmueble (p.e., por rotura de servicios) y cuando dicho hinchamiento máximo tiene lugar bajo las esquinas (tipo fenómeno producido por riego de jardines perimetrales). A veces no es tan fácil distinguir el tipo de hinchamiento, ya que no suele ser tan simétrico como los esquemas de la fig. 40. Ello, unido a la tradicional alarma frente a la expansividad de arcilla, hace que en muchas ocasiones se achaque a hinchamiento fenómenos contrarios, como los de asentamiento. Si bien, en definitiva, los daños se producen por movimientos diferenciales, ni el espectro de fisuración ni las soluciones a utilizar son similares.

Como se vé en la fig. 40 b, el espectro de fisuración puede ser similar cuando se produce un hinchamiento por humectación del terreno bajo el centro de un edificio (debido a una rotura de servicios o a que el inmueble impide la evaporación) y cuando los movimientos del terreno se deben a una retracción periférica (edificio construido al final de una etapa de alto contenido de humedad en el terreno, o desecación local por presencia de raíces de árboles). Aunque los fe-

nómenos no son análogos pueden producirse simultáneamente y conducen a fisuraciones similares.

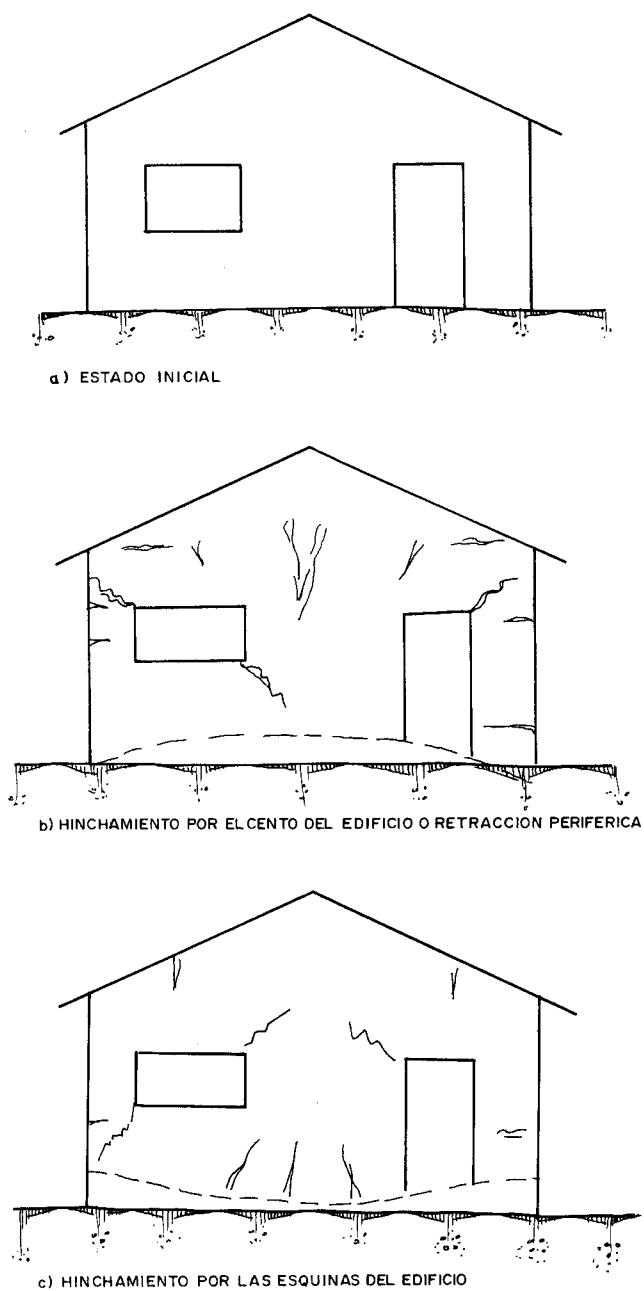


Fig. 40.—Agrietamiento esquemático de edificios sobre arcillas expansivas.

Por el contrario, la fig. 40 c, corresponde al caso de aumento de humedad del terreno perimetral al edificio, por falta de acerado, riego de jardines, etc. Aunque también puede deberse a la eliminación de árboles próximos al inmueble, con el consiguiente aumento local de humedad en la zona desecada por las raíces.

En otros casos la morfología de daños no es tan típica, por corresponder a fenómenos superpuestos, como en el caso de movimientos o deslizamientos de laderas, habituales en los cambios de estación seca a humeda en las ar-

cillas del sur de España, aún con pendientes suaves, como las de las «margas azules» del Guadalquivir, cuyo talud es, normalmente, de 8 a 12°.

9.2. Principios básicos del proyecto de cimentaciones sobre suelos expansivos

Por todas las razones expuestas, el proyecto de una cimentación en un terreno en el que se prevean importantes cambios volumétricos debe de contemplar los siguientes aspectos:

— La presión permanente que transmite el terreno debe de seleccionarse de forma que obstaculice el mayor porcentaje de hinchamiento posible. A tal efecto suele elegirse una presión igual o superior a la «presión de hinchamiento» (determinada en laboratorio). Este sistema, muy corriente en España, no contempla que los hinchamientos bajo el cimiento no son homogéneos ni uniformes en profundidad, pero suele ser bastante eficaz.

— La profundidad de cimentación debe ser tal que sobrepase la zona en la que se verifican los máximos cambios volumétricos periódicos, es decir, mayor que la denominada «zona o capa activa». La estimación de la profundidad de esta capa no es sencilla, ya que depende del clima de la zona, del potencial de succión del terreno, posición del nivel freático, etc. En España suele variar entre 2 y 4 m (JIMENEZ SALAS, 1980). En los estudios realizados por el I.G.M.E. en la zona de Córdoba, se concluyó que la zona activa podía tomarse como de 4 m para el Valle del Guadalquivir. Sin embargo, en suelos muy desecados, esta capa puede llegar a espesores de hasta 15 m, como ocurrió en el complejo de edificios en Kimberley, según ha descrito Williams en su comunicación al 7.º Congreso Africano de Mecánica del Suelo (1980).

— Las cimentaciones deben ser rígidas y si son corridas deben de ir armadas. En el caso de expansividad apreciable, deben tener poca superficie lateral, para evitar transmitir esfuerzos de hinchamiento. En tal sentido, es recomendable que, si se utilizan pozos de una profundidad de más de 2 m, se rodeen de grava o escoria, sellando superiormente el cimiento, para evitar la penetración de aguas superficiales (RODRIGUEZ ORTIZ, 1981).

— Es conveniente el disponer de arriostramientos entre los elementos de cimentación y el prever que la planta baja tenga un forjado propio, separando todos estos elementos del terreno superficial, mediante una cámara de aire o rellena de porexpan. Así, se evitan daños en soleadas, que llegan a producirse aunque el cimiento sea muy profundo.

— No es conveniente el empleo de sótanos, pero en caso de proyectarlos, debe prestarse especial atención a los muros, por los importantes

empujes laterales que pueden experimentar y hay que impermeabilizar bien en superficie, para evitar que llegue el agua de escorrentía a zonas profundas hasta ese momento no inundadas.

9.3. Tipología de cimentaciones

No hay un sistema único de cimentación para resolver los problemas planteados. Depende de la importancia del edificio, de su rigidez, variaciones climáticas, etc.

La tabla VII, tomada de JIMENEZ SALAS (1980), reproduce los procedimientos de construcción habituales sobre arcillas expansivas y relaciona la razón longitud/altura de los muros, (L/H), con la magnitud del hinchamiento, el tipo de construcción recomendada y el método de cimentación, según la experiencia de dicho autor y de otros especialistas. Como puede verse en dicha tabla, para edificios que han de experimentar movimientos no muy grandes, pueden utilizarse cimentaciones superficiales, mediante zapatas pequeñas y profundas —con arriostamientos— o mediante placas reforzadas por emparrillados, solución muy utilizada en los Estados Unidos y en Sudáfrica. Pero si los movimientos previsibles son muy grandes (5 a 10 cm), es recomendable aislar el edificio de dicho movimiento, mediante el uso de pilotes cilíndricos (a ser posible, de base ensanchada) y pisos de forjado colgado. Dado que el hinchamiento tiende a levantar los pilotes, estos pueden llegar a trabajar a tracción, por lo que deben resistir por debajo de la zona activa, llevar la armadura conveniente y no ser de gran diámetro (Fig. 41).

En estos casos las tracciones pueden ser importantes y el pilote debe de armarse adecuadamente, tal como lo muestran las medidas de Blight, realizadas con pilotes $\phi 1.050$ mm en arcillas sudafricanas (Fig. 42).

Esta solución, empleada extensamente en los edificios de la Meseta de Orcasitas (área del Sur de Madrid que ha tenido muchos problemas de expansividad), ha dado buenos resultados, considerando la capa activa con un espesor máximo de 4-5 m. En algunos países estos pilotes se emplean con base ensanchada, aunque en España esta práctica está poco extendida.

El empleo de pilotes —micropilotes, especialmente— se ha prodigado mucho como sistema de recalce en casos patológicos por expansividad de arcillas. Ahora bien, en caso de utilizarlos, debe de proyectarse adecuadamente su proceso constructivo, a fin de no aportar excesiva agua al terreno a atravesar.

También se han empleado soluciones de pozos para recalces, pero, en ese caso, ha de estudiarse la unión pozo-zapatas y zapatas-solera, ya que pueden seguir los hinchamientos efectuados por la solera y levantar las antiguas za-

patas, por falta de adecuado enlace al recalce.

A estas soluciones de transferencia de carga a zonas profundas deben de añadirse las de sustitución del terreno por un material no expansivo (generalmente zahorra bien graduada y bien compactada), y la de estabilización por adición de materiales que, mejorando el terreno, neutralicen su expansividad (por cambiar su red cristalina, absorber el agua, etc.). Esta estabilización —por ejemplo, con cal— mediante zanjas, inyecciones, etc., se ha utilizado más como medida de recalce que de solución de cimentación.

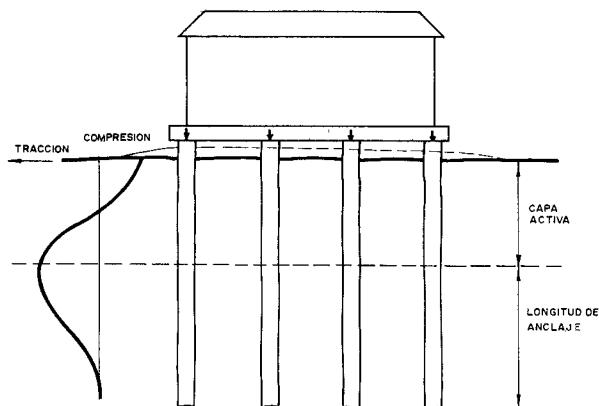


Fig. 41.—Solución de cimentación mediante pilotes, tipo «palafito».

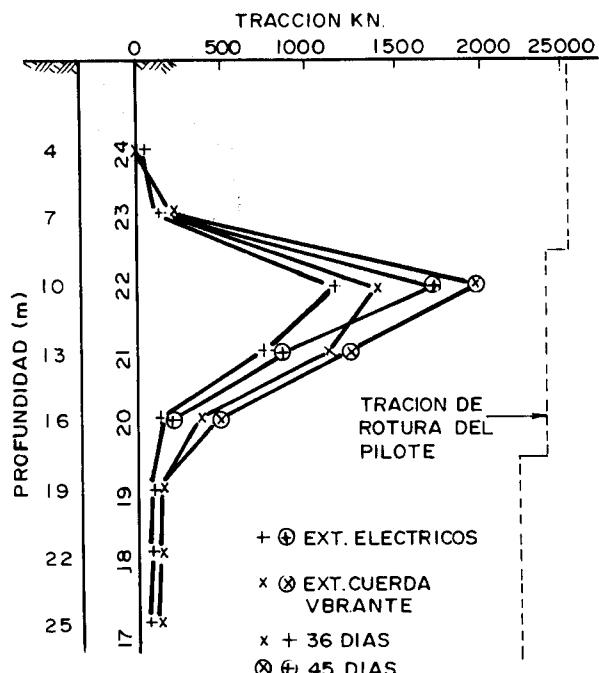


Fig. 42.—Variación de la tracción con la profundidad en un pilote instrumentado (Blight, 1984).

TABLA VII

Procedimientos de construcción sobre arcillas expansivas

<i>Levantamiento previsible en mm.</i>		<i>Construcción recomendada</i>	<i>Método</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Referencias bibliográficas</i>
<i>L/H = 1,25</i>	<i>L/H = 2,5*</i>				
0-6		Sin preocupaciones			
6-12	12-50	Edificio rígido tolerando el movimiento. Armaduras calculadas correspondientemente	Cimentaciones zapatas. Carreras corridas. Emparrillado.	Las zapatas deben ser pequeñas y profundas, calculadas según la carga admisible sobre el terreno. Los emparrillados deberán calcularse para las flexiones.	Means et al (1960).
			Placas. Con refuerzo emparrillado. Ref. unidireccional	Las placas deberán resistir los movimientos flectores previsibles y ser independientes de las carreras.	Lambe y Whitman (1965) Chen (1965) Dawson (1965) Lambe (1960)
			Muros.	Los muros sobre emparrillado o placas deben ser tan flexibles como ellos. Sin conexiones verticales. La fábrica de ladrillo estará reforzada con armaduras o vigas intercaladas.	
12-50	50-100	Edificios amortiguando el movimiento.	Juntas abiertas flexibles.	Los contactos entre las unidades estructurales deben evitarse o bien insertar un elemento flexible e impermeable.	
			Muros Flexibles Monolíticos Estructura metálica Cimentaciones Tres puntos Celular Con gatos.	Los muros monolíticos deben poder levantarse como una unidad. Las cimentaciones celulares permiten cierto hinchamiento reduciendo así la presión. Los gatos no son prácticos para propietarios particulares. La cimentación sobre tres puntos permite movimientos sin producir tensiones en la construcción.	Lange (1957)Templer (1957). Dawson (1959) Templer (1957)
50	100	Edificio independiente del movimiento.	Pilotes Cilíndricos Base ensanchada. Pisos en forjado colgado.	Deben colocarse pilotes del menor diámetro posible y a las distancias mayores, dentro de lo compatible con las cargas. Hay que dejar espacio bajo las carreras. Los pisos deben quedar sobre carreras, levantadas de 30 a 45 cm sobre el suelo.	Baracos y Bozozuk (1957). Dawson (1959)Clisby (1963) Seed y Chan (1959). Dawson (1959) Clisby (1963) Chen (1965).

Es necesario cuidar las uniones soleras-muros, sobre todo cuando éstos últimos se anclan, mediante pilotes, a capas profundas, acudiendo a soluciones como la de la fig. 43 (KUMAR, 1984).

La sustitución puede realizarse en todo el espesor de la capa activa o parcialmente, combiniéndola con estabilización del fondo de la zona sustituida. Hay que cuidar que el agua no penetre en el terreno natural por los contactos con la zona sustituida, por lo que el material de sustitución debe compactarse muy bien. Como medida complementaria puede disponerse alguna lámina impermeable de polivinilo, tratamientos asfálticos, etc. En Andalucía ha dado buenos resultados el material denominado «albero», dada su granulometría, compactabilidad y contenido en carbonatos. También puede pensarse en utilizar la misma arcilla, pero bien escarificada y remoldeada, compactada con un exceso de humedad, disponiendo medidas para evitar su cambio de contenido de agua. Dicha solución, utilizada en diversos canales de conduc-

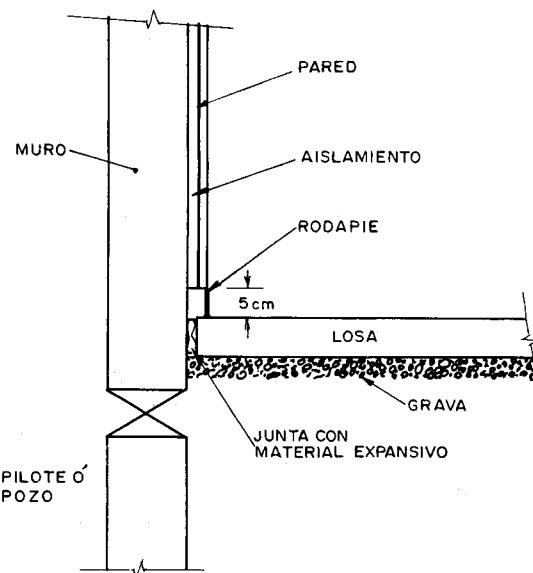


Fig. 43.—Solución típica de construcción de solera aislada en Colorado (Kumar, 1984).

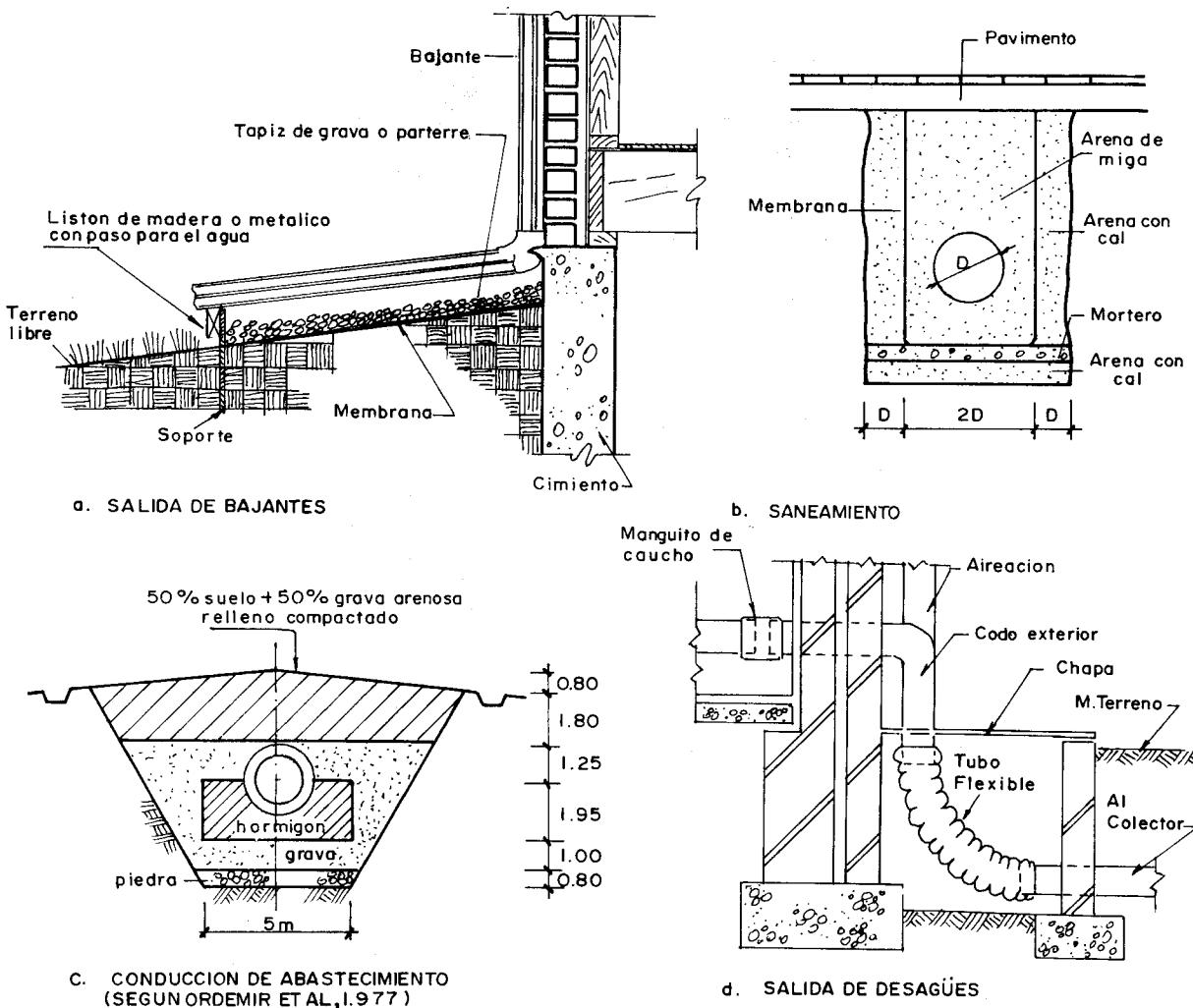


Fig. 44 Recomendaciones a adoptar en la red de saneamiento y abastecimiento de un edificio sobre arcilla expansiva (R. Ortiz, 1981).

ción de agua en España, Israel, Ecuador, etc., ha dado buen resultado, a pesar del tipo de obra en cuestión.

9.4. Precauciones adicionales

Además de todo lo comentado, debe de insistirse en las precauciones a tomar con los saneamientos, drenajes superficiales y todo aquello que puede hacer variar las condiciones de humedad en torno al edificio.

Un saneamiento defectuoso puede producir fugas por la unión de los tubos a las arquetas o la apertura de sus juntas, lo cual dará lugar a levantamiento de soleras y bordillos, empujes horizontales en muros de sótanos, etc. En la fig. 44 se muestran diversas soluciones para evitar estos problemas, propuestas por RODRIGUEZ ORTIZ (1981).

También hay que tener en cuenta la influencia de la vegetación próxima a un edificio sobre arcillas expansivas, lo cual ha sido tratado exclusivamente en un Simposio Internacional reciente (Londres, 1983). La vegetación, al cambiar las condiciones de humedad del terreno, puede convertirse en un elemento peligroso, sobre todo en las especies que desarrollan raíces de gran longitud. En la tabla VIII pueden verse las recomendaciones de LEGGET y CRAWFORD (1967) sobre peligrosidad de árboles.

Las raíces de los árboles tienden a tomar humedad y desecan el terreno, con la consiguiente retracción y asiento, fenómeno que puede combinarse con el hinchamiento bajo el edificio (Fig. 45).

RODRIGUEZ ORTIZ y SERRANO (1984 y 1985), en su comunicación al citado Simposio sobre vegetación, para remediar los posibles daños originados por la vegetación recomiendan:

a) Sustituir árboles caducos por otros perennes, generalmente coníferas.

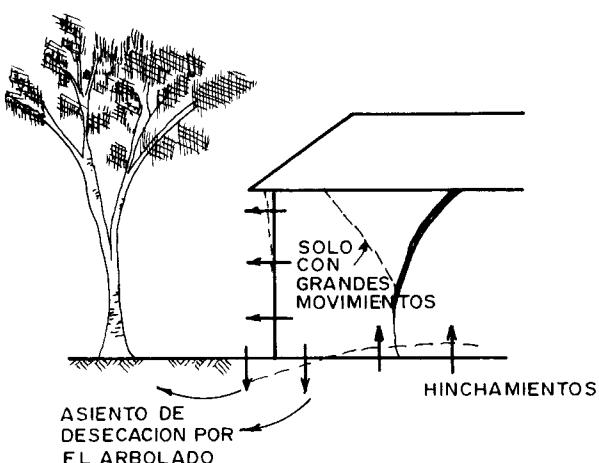


Fig. 45.—Daños típicos en edificios ligeros debidos a la combinación de hinchamiento central y desecación por árboles (Holland y Richards, 1984).

b) Colocar membranas aislantes y resistentes a las raíces, separando los jardines privados de las casas adyacentes (Fig. 46).

c) Eliminar setos y pavimentar en torno a los edificios.

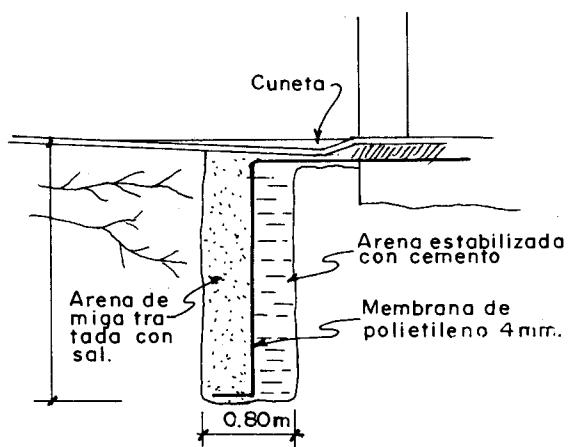


Fig. 46.—Detalle de zanja de intercepción de raíces y barrera de humedad en patios (R. Ortiz y Serrano, 1985).

Los acerados convencionales —de 1,2 a 1,5 m de anchura— deben disponerse sobre rellenos inertes compactados (arenas, zahorras, suelo estabilizado, etc.), y, como barreras verticales, también puede usarse el propio suelo estabilizado con cal. En este último caso, la barrera, perimetral al edificio, ha de tener una profundidad entre 2 y 4 m, a fin de afectar a la carga activa.

La fig. 47 muestra algunas soluciones alternativas, propuestas por HOLLAND y RICHARDS

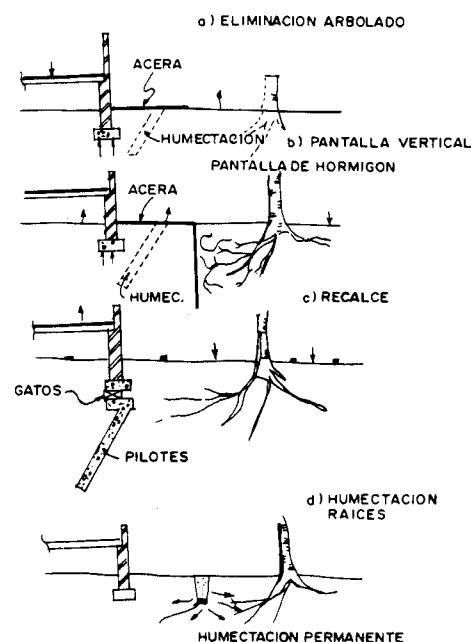


Fig. 47.—Soluciones alternativas para luchar contra los asentamientos debidos a desecación por presencia de árboles.

TABLA VIII
PELIGROSIDAD DE LOS ARBOLES EN
ARCILLAS EXPANSIVAS
(LEGGET Y CRAWFORD, 1967)

Muy peligrosos	Alamo, Chopo Aliso Acacia Sauce Olmo
Peligrosos	Arce Abedul Fresno Haya Encina
Poco peligrosos	Alerce Cedro Abeto

(1984), para remediar los problemas derivados del asiento de esquinas, originado por la desecación del terreno impuesta por la presencia de árboles.

En cuanto al cálculo de los cimientos debido a los esfuerzos de levantamiento, desarrollado hace más de veinte años por Jiménez Salas y ampliado, posteriormente, por otros autores, puede verse con detalle en trabajos de JIMÉNEZ SALAS (1980) y de LORENTE de NO (Curso sobre cimentaciones de terrenos metaestables. Fundación Agustín de Bethecourt, 1986), en los que se tiene en cuenta la interacción suelo-estructura.

Bibliografía

- ALVARADO, M. (1980): «Introducción a la Geología general de España». Bol. Geológico y Minero, T.XCI-I, pp. 1-65.
- ANDREI, S.; ATHANASIV, C. y MANRA, S. (1980): «Prediction of expansive clay behaviour». 4th International Conference on Expansive Soils. Denver, Proc., pp. 76-95.
- AYALA, J.F. (1975): «Las arcillas expansivas y el carst, dos problemas geotécnicos». Tecniterrae, n.º 7, pp. 26-31.
- AYALA, J.F. (1978): «Engineering properties of the Guadalquivir river marly clays ("blue marls") in Córdoba (Spain)». III Congreso Internacional A.I.G.I., Madrid, Sección II, Vol. 1, pp. 117-122.
- AYUSO, J. (1982): «Efectividad de la cal y el cemento en el control de la expansividad de la arcilla». Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia, n.º 152, pp. 3-11.
- BLIGHT, G.E. (1984): «Uplift Forces Measured in Piles in Expansive (1955)». Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils. Adelaide, pp. 240-244.
- BOWLES, F.A. (1978): «Clay as a sediment». The Encyclopedia of Sedimentology, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., pp. 139-148.
- BRACKLEY, I.J.A. (1980): «Prediction of soil heave from suction measurements». Seventh Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Proc. 1, pp. 159-166.
- CAROTHERS, H.P. (1965): «Cimentaciones en arcillas expansivas». Bol. de Inf. del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, n.º 38, pp. 19-50.
- CEOTMA. (1984): «Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología». Manuales, 3, 572 p.
- COSTA, J.E. y BAKER, V.R. (1981): «Superficial Geology: Building with the Earth». John Wiley & Sons, 498 p.
- CUELAR, V. (1978): «Análisis crítico de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansivas en obras de carreteras y recomendaciones sobre las técnicas más idóneas para su uso habitual en España». Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 303 p. (No publicado).
- DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS Y CAMINOS VECINALES (1967-1975). «Estudio Previo de Terrenos», Ministerio de Obras Públicas. (Varios volúmenes).
- DIXON, J.B., WEED, S.B. et al. (1977): «Mineral in Soil Environments». Soil Science of America, 948 p.
- DRISCOLL, R. (1984): «A Review of British Experience of Expansive Clay Problems». Fifth International Conference on Expansive Soils, Adelaide, Preprints of Papers, pp. 191-195.
- DUCHAUFOUR, P.H. (1977): «Pédologie 1: Pédogénèse et Clasification». Masson, Paris, 477 p.
- EL-SOHBY, M.A. y RABBA, E.A. (1981): «Some factors affecting swelling of clayey soils». Geotechnical Engineering, Vol. 12, pp. 19-39.
- ELIAS, F. y GIMENEZ, R. (1965): «Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España». Dirección General de Agricultura, Mapa Agronómico Nacional, 293 p.
- ELIAS, F. y RUIZ, L. (1977): «Agroclimatología de España». Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Cuaderno n.º 7, 29 p. y 1.061 fichas.
- ESCARIO, V. (1969). «Determination of geotechnical characteristics of expansive soils». Second International Research of Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Proc., pp. 114-120.
- ESCARIO, V. (1981): «Ensayos de corte y penetración con succión controlada». Bol. Inf. Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, n.º 144, pp. 3-13.
- ESCARIO, V. (1985): «Síntesis Geotécnica de los Suelos de Madrid y su Alfoz». Dirección General de Infraestructura del Transporte, M.T.T. y C., 80 p. y 2 Mapas.
- ESCARIO, V. y SAEZ, J. (1973): «Measurements of properties of swelling and collapsing soils under controlled suction». Third International Conference on Expansive Soils. Proc., pp. 195-200.
- ESCARIO, V. y SALINAS, J.L. (1984): «Introducción del concepto de cambio lateral de facies en la definición de la estructura geotécnica de Madrid». Simp. sobre Geotecnología del Subsuelo de Madrid, figs. 3, 10 p. (Publicado en el Boletín de la S.E.M.S., n.º 74 y en el Sol. de Inf. del Lab. Catr. y Geo. n.º 168).
- FERNANDEZ, C. (1984): «Suelos y yacimientos de Castilla y León». Seminario sobre Pavimentos de Hormigón en Vías Rurales y Urbanas, León, 24 p.
- FERNANDEZ, S. (1979): «Estudio de las propiedades geotécnicas de las arcillas azules del Guadalquivir con especial aplicación a la estabilidad de los taludes naturales a largo plazo». Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- FONT, I. (1983): «Climatología de España y Portugal». Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 296 p.
- FUENTE, P. DE LA (1984): «Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid». Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. (1979): «Influencia de la génesis, mineralogía y fábrica en las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos de la Laguna (Tenerife)». Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 267 p. y apéndices.
- GRIM, R.E. (1962): «Applied Clay Mineralogy». McGraw-Hill, N.Y.
- GRONKO, G.J. (1974): «Review of Expansive Soils». Journal of the Geotechnical Engineering Division, June, pp. 667-687.
- HAMILTON, J.J. (1980): «Behavior of expansive soils in western Canada». 4th International Conference on Expansive Soils. Denver, Proc., pp. 815-833.
- HARDY, R.M. (1965): «Identification and performance of swelling soil types». Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, n.º 2, pp. 141-166.
- HOLLAND, J.E. y LAWRENCE, C.H.E. (1980): «Seasonal heave of australian clay soils». 4th Int. Conf. on Expansive Soils. Denver, Proc., pp. 302-321.
- HOLLAND, J.E. y RICHARDS, J. (1984): «The Repair of Light Structures Damaged by Expansive Clay Movements». Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils. Adelaide, pp. 258-262.
- HORTA DA SILVA, J.A. (1975): «Solos expansivos: Comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projectos de fundações». Geotecnia n.º 13, Junho-Julho, pp. 29-63 y n.º 14, Octubre-Novembro, pp. 5-18.
- INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS (1976): «Manual of applied geology for engineers». I.C.E., London, 378 p.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Mapa Nacional de Síntesis Geológica. Escala 1:200.000», 87 Hojas y Memorias.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Mapa Nacional Geotécnico General. Escala 1:200.000». 93 Hojas y Memorias.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Mapa Nacional de Rocas Industriales. Escala 1:200.000». 93 Hojas y Memorias.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Mapa Geotécnico de Ordenación Territorial y Urbana. Escala 1:100.000». Varias publicaciones.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Mapa Geotécnico para Ordenación Territorial y Urbana. Escala 1:25.000». Córdoba, Granada, Huelva, Málaga, Murcia, Sevilla y Valladolid.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1966): «Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias, Escala 1:1.000.000».
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1980): «Mapa Geotécnico de la España Peninsular, Baleares y Canarias, Escala 1:1.000.000».
- INSTITUTO NACIONAL DE EDAFOLOGIA Y AGROBIOLOGIA (1967): «Mapa de Suelos de España, escala 1:2.000.000».
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1960): «Informe sobre las condiciones de cimentación del 6.º Depósito del Canal de Isabela III». Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 54 p., (no publicado).
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1965): «Calculation methods of the stresses produced by swelling clays». First Int. Res. and Eng. Conf. on Expansive Clay Soils, Texas, pp. 330-344.
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1980): «Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables». Geotecnia y Cimientos III, primera parte, Ed. Rueda, Madrid, pp. 533-650.
- JIMENEZ SALAS, J.A. y ESCARIO, V. (1965): «Contribuciones a la conferencia internacional sobre arcillas expansivas de Texas». Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Publ. 20, 23 p.

- JIMENEZ SALAS, J.A. y JUSTO, J.L. (1975): «Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas». Ed. Rueda, Madrid, 466 p.
- JOHNSON, L.D. (1979): «Overview for design of foundations on expansive soils». U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper GL-79-21, 60 p., 8 tab. y 4 apéndices.
- JONES, E. (1973): «Expansive soils and housing development». Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, Vol. 1, pp. 16-43.
- JUSTO, J.L. y CUELLAR, V. (1972): «Humedad de equilibrio en el terreno. Mapa de España del Índice de Thorthwaite». Bol. de Inf. del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, n.º 89, pp. 3-23.
- JUSTO, J.L. y SAETERSDAL, R. (1982): «Parámetros de proyecto para condiciones especiales del suelo». Bol. Inf. Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, n.º 152, pp. 13-48.
- KOMORNÍK, A. y DAVID, D. (1969): «Prediction of swelling pressure of clays». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, January, pp. 209-225.
- KROHN, J.P. y SLOSSON, J.E. (1980): «Assesment of expansive soils in the United States». 4th Int. Conf. on Expansive Soils. Denver, Proc., pp. 596-608.
- KUMAR, N. (1984): «Review of Common Design and Construction Practices on Expansive Soils in Colorado». Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils. Adelaide, pp. 105-169.
- LAMB, D.R. y HANNA, S.J. (1973): «Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction». Federal Highway Administration, Vol. 1, 349 p. y Vol. 2, 303 p.
- LAMBE, T.W. (1960): «The character and identificación of expansive soils». Federal Housing Administration, Report FHA-701, Washington, D.C.
- LEPP, H. (1973): «Dynamic Earth». McGraw-Hill, N.Y., 485 p.
- LOW, PH.F. (1973): «Fundamental mechanisms involved in expansion of clays, as particularly related to clay mineralogy». Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, Vol. 1, pp. 70-91.
- LYTTON, R.L. (1973): «Expansive clay roughness in the highway design system». Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, Vol. 2, pp. 123-149.
- MACAU, F. et al. (1970): «Mapa litológico de España Peninsular e Insular». I.N.E., S.G.O.P. e I.G.M.E., Madrid, Cartografía 1/500.000 y Memoria, 5 p.
- MILLOT, G. (1964): «Géologie des argiles». Masson et Cie., Paris, 499 p.
- MILLOT, G. (1979): «Clay». Scientific American, Vol. 240, n.º 4.
- NUQUES, J.A. y RIPALDA, O.F. (1981): «Suelos expansivos en la cuenca del río Guayas». I Congreso Internacional de Suelos Trópico-Andinos, 112 p.
- OLALLA, C.; SOPEÑA, L.; SALINAS, J.L. y MANCHON, F. (1984): «Los condicionantes geológico-geotécnicos en la planificación de usos del suelo: Madrid y el ejemplo de Mercamadrid». Simp. sobre Geotecnología del Subsuelo de Madrid. Ayuntamiento de Madrid, Comunicación, 22 p.
- OTEO, C. y FERNANDEZ MOYA, J. (1978): «FF.CC. metropolitano Estrella-Pavones: Informe sobre la auscultación del túnel y propiedades del terreno». Lab. Carreteras y Geotecnia, 185 págs.
- OTEO, C. (1986): «Las arcillas expansivas en España: Distribución y propiedades». Curso sobre Cimentaciones en Terrenos Metaestables: Colapsables y Expansivos. Vol. II, 20 p. E.T.S.I.C.C.
- PATRICK, D.M. y SNETHEN, D.R. (1976): «An occurrence and distribution survey of expansive materials in the United States by physiographic areas». Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-76-82, 73 p.
- PORTER, A.A. (1977): «The mechanics of swelling in expansive clays». Tesis, Colorado State University, 103 p.
- POUSADA, E. (1984): «Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada». (Tesis Doctoral dirigida por V. Escario). Cuadernos de Investigación, CEDEX, 274 p.
- PUSCH, R. (1979): «Water uptake and swelling of montmorillonitic clay seams in rock». Proc. 4th Int. Congress on Rock Mechanics, Montreux (Suisse), Vol. I, pp. 273-278.
- RAVINA, I. (1973): «Swelling of clays, mineralogical composition and microstructure». Third Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, Proc. Vol. 1, pp. 61-63.
- RIEKE, H.H. y CHILINGARIAN, G.V. (1978): «Compaction in sediments». The Encyclopedia of Sedimentology, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., pp. 176-181.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. (1975): «Las arcillas expansivas: su estudio y tratamiento». Bol. de Inf. del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, n.º 108, pp. 3-30.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. (1981): «Cimentaciones en terrenos difíciles». Curso sobre Cimentaciones, C.O.A.M., pp. 111-134.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M.; JIMENEZ SALAS, J.A. y SERRANO, A. (1984): «The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays». Fourth Géotechnique Symposium. Discussion. Géotechnique, Vol. XXXIV, No. 2, pp. 139-172.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. y SERRANO, A. (1974): «Poblado Dirigido de Orcasitas: Informe General». Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. (Informe no publicado).
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. y PRIETO, C. (1976): «Los materiales del Keuper y su incidencia sobre los taludes de Obras Viales». Memorias del Simposio Nacional sobre Rocas Blandas, Comunicación C-10, 8 p.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. y SERRANO, A. (1985): «La influencia de la vegetación sobre el hincharcimiento y retracción de las arcillas». Bol. de Inf. del Laboratorio de Carreteras y Geotecnica, n.º 167, pp. 3-10.
- SAEZ, J. (1986): «Mecanismo de expansión a nivel mineralógico». Curso sobre Cimentaciones en Terrenos Metaestables: Colapsables y Expansivos, 13 p., E.T.S.I.C.C.P.
- SALINAS, J.L. (1970): «Génesis de las bentonitas». Curso de Geología y Mineralogía de Arcillas, Facultad de Ciencias. Revisión bibliográfica, 24 p. Inédito.
- SEED, J.; WOODWARD, R.J. y LUNDGREEN, R. (1962): «Prediction of swelling potential for compacted clays». ASCE, Proc. Vol. 88, pp. 53-87.
- SERRANO, A., et al. (1981): «Análisis de los fenómenos de expansión de una formación de margas yesíferas». Bol. Inf. Laboratorio Carreteras y Geotecnia, n.º 146, pp. 9-16.
- SKEMPTON, A.W. (1953): «The colloidal activity of clays». III Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Zürich, Vol. 1, pp. 57-61.
- SNETHEN, D.R. (1979): «Technical guidelines for expansive soils in highway subgrades». Report No. FHWA-RD-79-51. Federal Highway Administration, 168 p.
- SNETHEN, D.R. (1984): «Evaluation of Expedient Methods for Identification and Classification of Potentially Expansive Soils». Fifth Int. Conf. on Expansive Soils, Adelaide. Preprints of Papers, pp. 22-26.
- SNETHEN, D.R.; JOHNSON, L.D. y PATRICK, D.M. (1977): «An investigation of the natural microscale mechanisms that cause volume change in expansive clays». Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-77-75, 285 p.
- SOLE SABARIS, L. (1952): «España: Geografía Física» (Geografía de España y Portugal, Tomo I). Montaner y Simón, Barcelona, 500 p.
- TOURTELOT, H.A. (1973): «Geologic origin and distribution of swelling clays». Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, Vol. 1, pp. 44-69.
- URIEL, A. (1986): «Patología de las cimentaciones». Curso sobre Patología de las Cimentaciones, CEDEX, 31 p.
- URIEL, S. y OTEO, C. (1976): «Propiedades geotécnicas de las margas azules de Sevilla». Simp. Nacional sobre Rocas Blandas, Madrid, Memorias, Vol. 1, Comunicación A-9.
- VELDE, B. (1985): «Clay minerals: A Physico-Chemical Explanation of their Occurrence». Elsevier, 426 p.
- VIJAYVERGIYA, V.N. y GHAZZALY, O.I. (1973): «Prediction of swelling potential for natural clays». 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa. Proc., Vol. I, pp. 227-236.
- WEAVER, C.H.E. (1978): «Clay sedimentation facies». The Encyclopedia of Sedimentology, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., pp. 159-164.