

# VALORACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR NITRATOS MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS DRASTIC Y SINTACS\*

F.P. Nicoletti<sup>1</sup> y R. Spandre<sup>2</sup>

**RESUMEN:** Para la valoración del riesgo de contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de una parte de la Llanura Apuana (comprendida en los terminos municipales de Montignoso, Massa y Carrara), se confrontan dos modelos paramétricos de puntuación: el DRASTIC (acrónimo de Deep water; Recharge, net; Aquifer media; Soil media; Topography; Impact of vadose zone; Conductivity hydraulic) y el SINTACS (acrónimo de Soggiacenza-nivel freático-; Infiltración; efecto de autodepuración de la zona No saturada; Tipología de los suelos de cobertera; litología del Acuífero; Conductividad hidráulica; pendiente de la Superficie topográfica). En el área de estudio, ubicada a SO de los Alpes Apuanos, hay un acuífero principal formado prevalentemente por gravas y, en una estrecha franja costera, por unas arenas. Para la aplicación del modelo DRASTIC el área entera ha sido dividida en varias sub-áreas sobre la base de los valores de los parámetros que están sujetos a variaciones (D, R, A, I). Para cada zona se calcula el índice de vulnerabilidad PP que nos permite la subdivisión de la superficie total en dos clases de riesgo: un sector de riesgo elevado y otro de riesgo muy elevado. La aplicación del modelo SINTACS se basa en una división de la superficie total en un retículo compuesto por 253 celdas cuadradas de 0,5 km de lado. El índice de vulnerabilidad se calcula para cada celda de tal manera que se puedan agrupar, sucesivamente, en clases de riesgo. De este modo se obtienen tres zonas que presentan clases de riesgo: muy elevado, elevado y alto. En conclusión, comparando los resultados obtenidos, se confirma la presencia de dos clases coincidentes y con igual riesgo de contaminación. Además, el SINTACS evidencia también una pequeña área en la cuál el riesgo cae en una clase ligeramente inferior a las otras dos.

**ABSTRACT:** To evaluate the risk of pollution of the underground water by nitrates in a portion of the Pianura Apuana (bounded by the towns Montignoso, Massa and Carrara), two parametric models: DRASTIC (acronym of Deep water; Recharge net; Aquifer media; Soil media; Topography; Impact of vadose zone; Conductivity, hydraulic) and SINTACS (acronym of Soggiacenza, Infiltrazione, effetto di autodepurazione del Non-saturo, Tipología della copertura, litología dell'Acquifero, Conducibilità idraulica acclività della Superficie topográfica) are applied and compared. In the studied area, which is located at SW of the Apuane, is present a principal aquifer composed of gravel, and only in a smaller coastal band of sand. To apply DRASTIC the area is divided into different subzones by the value of variable parameters D, R, A, I. It is calculated the vulnerability index PP for each subzone, and the whole area, on the base of the PP value, is subdivided into 2 risk classes: a sector of elevated risk and a sector of very elevated risk. To apply SINTACS the area is separated into 253 square mesh with a side 0.5 km long. The vulnerability index is calculated for each cell, so that all of them can be divided according to different class of risk. In this way the total area is subdivided into 3 class of risk: a zone with very elevated risk, a zone with elevated risk and a zone with high risk. The application of the two different methods leads to an identical results if we exclude the smaller zone with high risk detected by means of SINTACS.

## INTRODUCCIÓN

Según estudios recientes llevados a cabo por el OCSE (1987), las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas han ido aumentando en los últimos años, alcanzando, en unos sitios, valores próximos, si no superiores, a los límites máximos admitidos para las aguas potables

En Italia, el problema de la contaminación de las aguas, que en el último decenio ha estado cada vez

más a la orden del día, ha alcanzado ya un carácter de urgencia, sobretudo después de que haya sido fijado por el Consejo de Ministros en 50 mg/l el límite máximo de concentración de los nitratos en las aguas potables.

Para solucionar en manera correcta el problema del saneamiento de las aguas potables en las zonas "críticas", la valoración del riesgo de contaminación de los acuíferos representa, por lo tanto, un instrumento imprescindible.

<sup>1</sup> Centro di Studio per la Geología Strutturale e Dinámica dell 'Appennino

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Pisa. Via S. Maria 53, 56126 PISA (Italia) e-mail: spandre@dst.unipi.it

\*Trabajo realizado con fondos MURST 60%.

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.3 Num.4 (diciembre 1996), páginas 7-24, recibido el 29 de febrero de 1996 y aceptado para su publicación el 20 de junio de 1996. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado

Con este fin, en los últimos años han sido perfeccionadas una serie de metodologías aptas a ofrecernos un cuadro representativo de la situación. Entre los modelos propuestos, los de tipo paramétrico parecen ofrecer los mejores resultados. Entre estos los modelos **DRASTIC** (Aller et al., 1987) y el **SINTACS** (Civita, 1994) han obtenido una considerable difusión. El éxito de estos métodos se debe a su relativa simplicidad de aplicación en situaciones muy diferentes entre sí, y al hecho de que las numerosas aplicaciones han permitido un ajuste de los sistemas haciéndolos suficientemente seguros.

La realidad hidrogeológica de la cuenca del Mediterráneo ha evidenciado algunas diferencias con la de América del Norte, hasta el punto que numerosos investigadores europeos han pensado que fuese necesario introducir una nueva metodología para adecuar el método **DRASTIC** a la situación mediterránea. El modelo **SINTACS** (acrónimo de "Soggiacenza" -nivel freático-, Infiltración, efecto de autodepuración de la zona No-saturada, Tipología del material de recubrimiento, Conductividad hidráulica, pendiente de la Superficie topográfica) ha sido propuesto por un equipo de investigadores italianos (Civita, 1994) y, aparentemente, es similar al modelo **DRASTIC** a partir del cual se ha diferenciado con el tiempo y a las pruebas a los cuales ha sido sometido. La versatilidad de los métodos paramétricos se acopla

muy bien a los estudios de planificación del territorio por el hecho de que permiten el uso simultáneo de datos cartográficos y numéricos. Como limitación obvia a los sistemas hay que decir que ambos, a pesar de las peculiaridades antes mencionadas, son modelos esencialmente cualitativos más que estrictamente cuantitativos.

Este trabajo propone una comparación entre el método **DRASTIC** y el **SINTACS** que han sido aplicados a la llanura Apuana en un tramo que comprende parte de los terminos municipales de Montignoso, Massa y Carrara (Figura. 1); el lugar ha sido escogido por la elevada presencia de nitratos en las aguas subterráneas y por los numerosos datos geológicos e hidrogeológicos de que se dispone. Dichos datos han sido considerados suficientes para satisfacer los parámetros de los modelos que nos sirven para definir la vulnerabilidad del acuífero principal a la contaminación por nitratos que, en este área representan un peligro real (Figura 2). El origen de este tipo de contaminantes procede esencialmente del elevado desarrollo de la agricultura, que utiliza grandes cantidades de productos nitrogenados, orgánicos o no. Además tenemos que considerar la penetración en el subsuelo y, en consecuencia, en las aguas subterráneas, de los compuestos orgánicos e inorgánicos procedentes de las actividades antrópicas, desde una red de alcantarillado muchas veces no idónea.

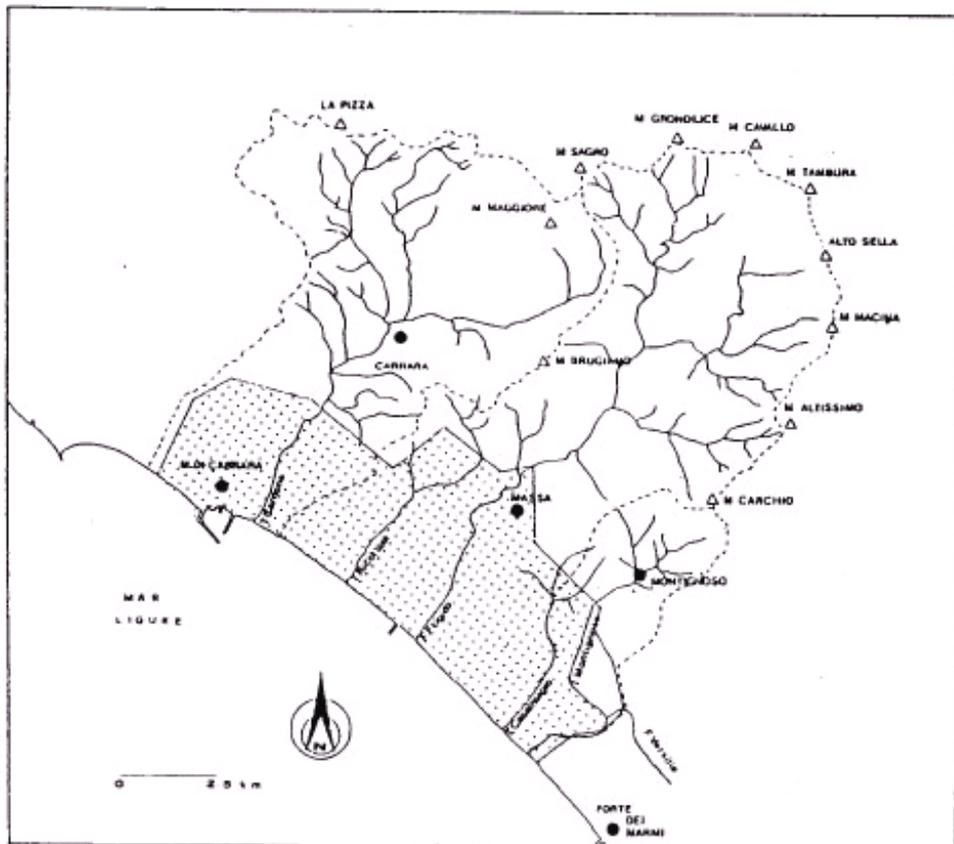


Figura 1. Area de estudio

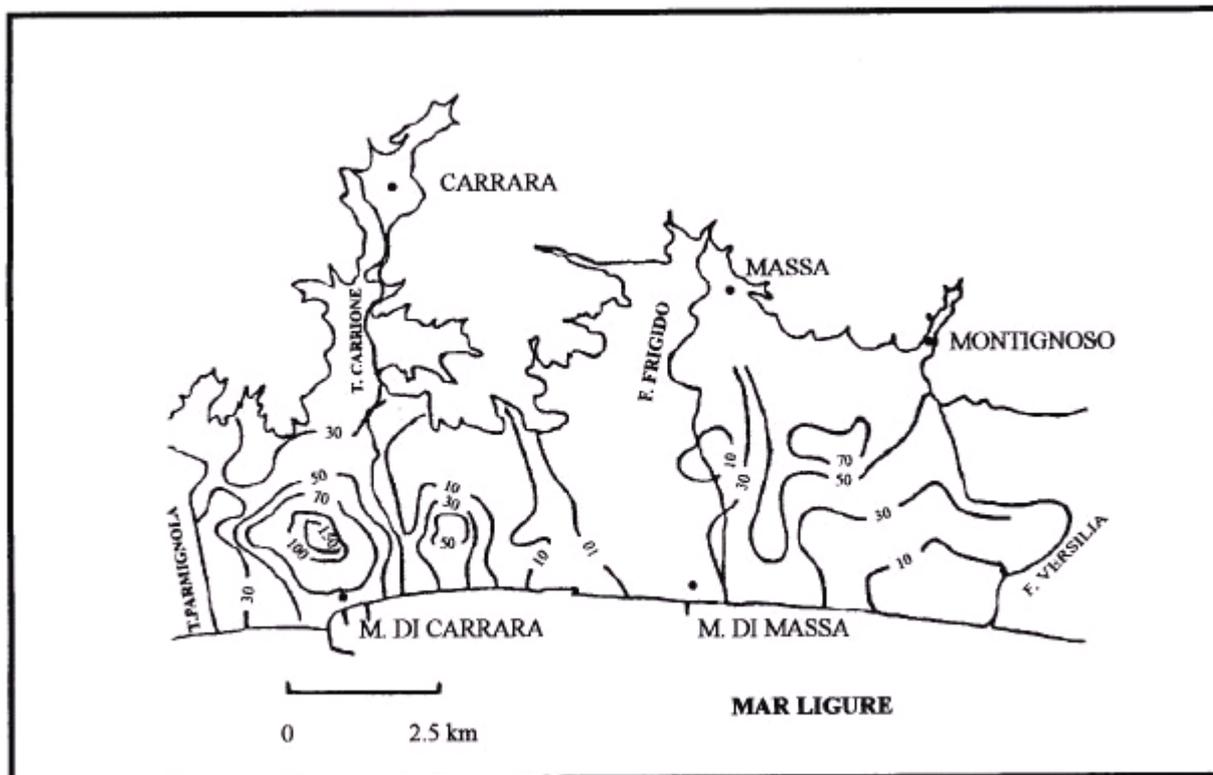


Figura 2. Líneas de igual concentración

## DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

La región de estudio está incluida en las hojas geológicas a escala 1:100.000 N.96 (Massa) y N. 104 (Pisa) y está delimitada al NO por el río Parmignola, al SE por los canales Versilia y Montignoso, al N por las unidades precuaternarias y al SO por el Mar Ligure.

La llanura Apuana está formada por unos depósitos sedimentados en un ambiente de subsidencia generado por movimientos distensivos, todavía activos, del margen occidental de los Apeninos orientales (Graben de Versilia). Desde el punto de vista geológico (Figura 3) se puede dividir en tres zonas (Sestini 1950):

- 1) **zona interior**, ubicada a los pies de las montañas (formadas por un basamento paleozoico y por las coberturas mesozoicas-terciarias de los Alpes Apuanos), y compuesta en su mayoría por depósitos que se han sedimentado en los Apuanos), abanicos fluviales de los ríos;
- 2) **zona intermedia**, en la cual se pueden reconocer los depósitos palustres y lacustres;
- 3) **zona de litoral** formada prevalentemente por depósitos arenosos en facies de retroplaya y dunas de arena.

Los depósitos asociados a los abanicos aluviales están constituidos, en su mayoría, por gravas mal graduadas y bien redondeadas con cantos de calizas (procedentes del complejo metamórfico Apuano) y de areniscas ("Falda Toscana"), sólo en manera subordinada están presentes unas pizarras de origen apuano. La matriz es de tipo arenoso con una granulometría medio-fina. Dichos depósitos aparecen, por lo general, sueltos, presentándose sólo en raras ocasiones debilmente cementados; por lo que es posible clasificarlos como conglomerados. En la proximidad de los relieves se encuentran los depósitos detríticos-coluviales actuales, que ocupan pequeñas superficies y están constituidos por un conjunto de sedimentos limosos y arenosos ricos en cantos y guijarros. Los sedimentos de la zona intermedia están formados por una alternancia irregular de niveles arcillosos, limosos y arenosos con una granulometría fina. Estos niveles presentan de vez en cuando alguna que otra intercalación de cantos y turbas. La zona de litoral está constituida en su casi totalidad por arenas medias bien redondeadas de granulometría homogénea.

Según la permeabilidad, podemos afirmar que todos los litotipos ricos en gravas resultan ser permeables incluso cuando están cementados, ya que en la estructura de los depósitos se ha evidenciado una elevada fracturación, provocada por movimientos tectónicos recientes. En los sedimentos que constituyen el piedemonte, la fracción fina (arcillosa y limosa) prevalece sobre la más gruesa (gravas), por lo cual la permeabilidad media resulta ser baja. Las arenas de

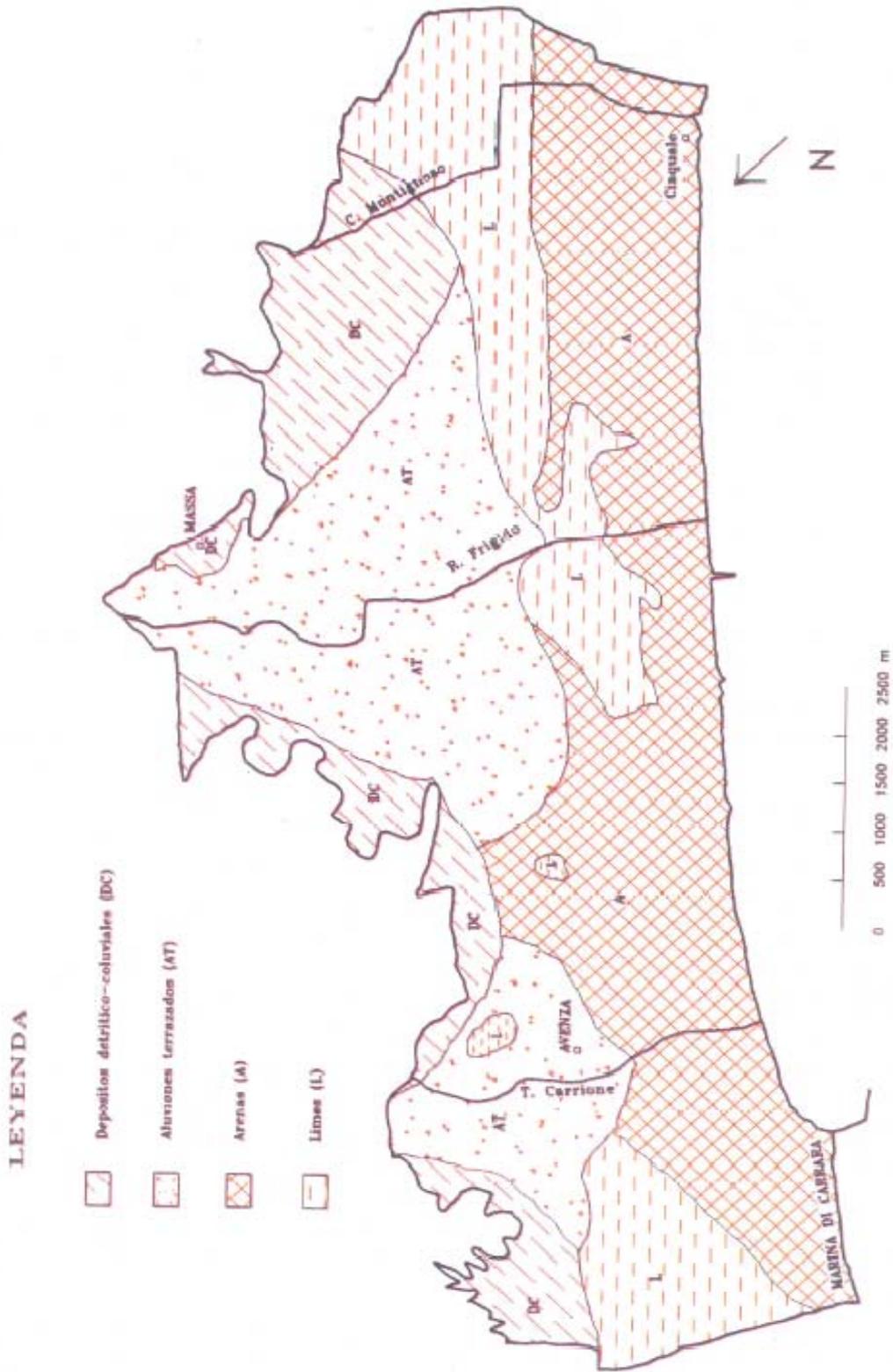


Figura 3. Esquema geológico

origen marino o eólico, a pesar del recubrimiento limoso y las intercalaciones turbosas poseen una elevada permeabilidad, dado que los niveles menos permeables no se extienden en la totalidad del área, resultando limitados lateralmente. Todos estos datos nos llevan a la conclusión que los depósitos de toda la llanura Apuana poseen una permeabilidad muy parecida entre sí.

Desde el punto de vista geométrico, casi todos los sedimentos tienen una disposición sub-horizontal, presentando una ligera inclinación sólo en los puntos de contacto con las formaciones pre-cuaternarias, en la base de las laderas de las montañas.

Según los datos existentes (Salvatori, 1994; Salvatori y Spandre, 1996), se deduce que el acuífero principal está formado por aluviones de terrazas y recientes y se puede considerar como un medio monocapa freático; sólo en unos puntos en los que está recubierto por sedimentos limosos, el acuífero en cuestión adquiere unas características cautivas. Si se observa el mapa de las isopiezas (Figura 4), se nota que la profundidad del acuífero en la mayoría del área de estudio no supera los 2 metros; sólo si nos desplazamos hacia el noroeste, donde se encuentran las colinas, la superficie piezométrica alcanza una profundidad de unos 10 m.

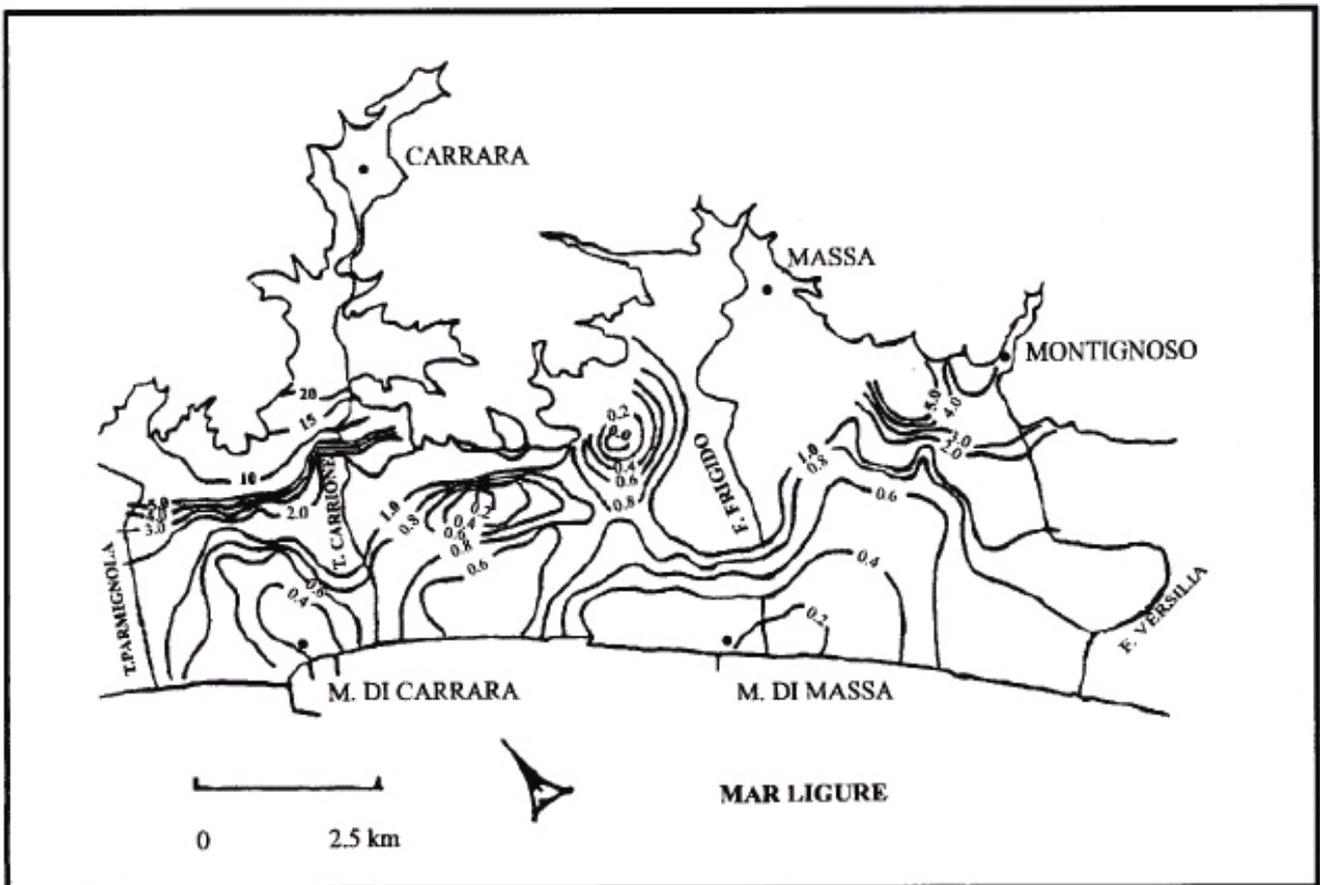
**EL MODELO DRASTIC**

El modelo DRASTIC se puede describir en manera sintética ilustrando la metodología en la cual se basa y el significado de cada uno de los parámetros que componen el acrónimo (las tablas que siguen a continuación proceden de los trabajos de Aller et al., 1987; Persicani et al., 1991 y Civita, 1994 con algunas modificaciones).

- 1) **D** (Deep water): profundidad del acuífero con respecto al nivel del suelo: representa el espesor de los depósitos que el flujo contaminante tiene que atravesar antes de alcanzar el acuífero. La puntuación que se debe asignar a cada intervalo de profundidad es la que figura en la Tabla 1.

*Tabla 1 Valores de intensidad del factor D*

Profundidad del acuífero (m)	Puntuación
0-1,5	10
1.5-4,5	9
4,5-9,0	7
9,0-15,0	5
15,0-22,5	3
22.5-30,0	2
>30,0	1



*Figura 4. Isopiezas*

2) R (Recharge net): recarga neta: representa el volumen de agua meteórica que se infiltra en el suelo por unidad de superficie, menos las pérdidas por el flujo superficial y por evapotranspiración. El valor de los intervalos representativos y las puntuaciones relativas son los que se muestran en la Tabla 2

**Tabla 2** Valores de intensidad del factor R

Recarga neta del acuífero (mm)	Puntuación
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
> 250	9

3) A (Acuifer media): medio acuífero, representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes. Las puntuaciones relativas a las distintas litologías son las que figuran en la Tabla 3. Considerando que la puntuación correspondiente a cada litología posee un intervalo

**Tabla 3** Valores de intensidad del factor A

Medio acuífero	Puntuación
Arcillas y margas compactas	1-3
Rocas ígneas y metamórficas inalteradas	2-5
Rocas ígneas y metamórficas alteradas	3-5
Alternancias de margas, areniscas y calizas	5-9
Areniscas macizas	4-9
Calizas macizas	4-9
Gravas y arenas	4-9
Basaltos	2-10
Calizas karslificadas	9-10
Factores relativos de atenuación de la contaminación para los principales tipos de acuíferos.	
Las categorías han sido repartidas según:	
a) longitud y tortuosidad de los recorridos de las líneas de flujo	
b) potencial general de absorción	
c) dispersión	
d) reactividad	
e) grado de fracturación	
Los factores principales que controlan la puntuación para cada tipo de roca son:	
1. Reactividad (solubilidad y fracturación)	
2. Fracturación	
3. Longitud y forma del recorrido; absorción; dispersión; todos estos son determinados principalmente por la granulometría, por la absorción y la compactación	
4. Longitud y recorrido determinados por la estratificación y fracturación	
5. Absorción y dispersión	
6. Fracturación; longitud y recorrido determinados por las relaciones intergranulares;	
7. Reactividad (solubilidad) y fracturación	
8. Fracturación y absorción	

de variación que, a veces, es muy amplio se ofrece una serie de consideraciones para decidir de la mejor manera cual de los intervalos debe ser considerado.

4) S (Soil media): características del terreno, representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización convectiva y/o difusiva de las sustancias contaminantes. En la Tabla 4 se indican los varios tipos de suelos y las puntuaciones relativas. Se ofrece además un diagrama triangular ALA<sub>r</sub> (Arcilla - Limo - Arena) para simplificar la elección del tipo de suelo (Figura5).

**Tabla 4** Valores de intensidad del factor S

Tipo de suelo	Puntuación
Suelo delgado o ausente	10
Suelo gravoso	10
Suelo arenoso	9
Suelo turboso	8
Suelo arcilloso usurado	7
Suelo franco-arenoso	6
Suelo franco	5
Suelo franco-arcilloso	3
Suelo arcilloso orgánico superficial	2
Suelo arcilloso compacto	1

5) T (Topography): topografía del área: representa la pendiente de la superficie topográfica, según la cuál se acelera o decelera el flujo superficial. Las puntuaciones relativas a cada clase aparecen en la Tabla 5.

**Tabla 5** Valores de intensidad del factor T

Pendiente de la superficie topográfica (%)	Puntuación
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

6) I (Impact of vadose zone): características de la zona no saturada, representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical. En la Tabla 6 están descritas las puntuaciones relativas a las distintas litologías. Como en el parámetro A, también en este caso se ofrecen unos criterios para permitir una elección más apropiada de las puntuaciones relativas a cada litología

7) C (Conductivity, hydraulic): conductividad hidráulica del acuífero, representa la capacidad del acuífero para transmitir horizontalmente la sustancia contaminante. Las puntuaciones aplicables en cada intervalo figuran en la Tabla 7.

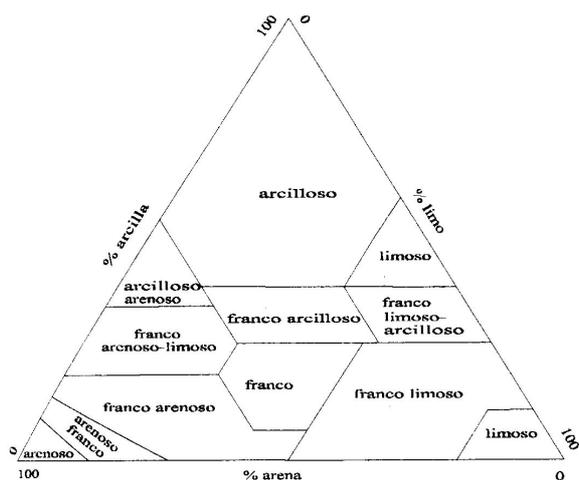


Figura 5 Triángulo de texturas

Tabla 6 Valores de intensidad del factor I

Impacto de la zona de transición	Puntuación
Limos y arcillas	1-2
Argilitas y margas	2-5
Calizas	2-7
Areniscas	4-8
Alternanzas de margas, areniscas y calizas	4-8
Gravas y arenas mixtas con limos arcillosos	4-8
Rocas ígneas y metamórficas	2-8
Gravas y arenas	6-9
Basaltos	2-10
Calizas karstificados	8-10
Acción de los litotipos principales que forman la zona subsaturada	
Las categorías han sido subdivididas según:	
a) longitud y tortuosidad del recorrido	
b) potencial de dispersión y dilución Correspondiente	
c) reactividad (solubilidad)	
d) absorción global	
e) fracturación	
Principales factores de control de las puntuaciones (los numerosos corresponden a los de los medios principales descritos):	
1. Absorción global y fracturación;	
2. Fracturación y reactividad;	
3. Fracturación; longitud y tortuosidad del recorrido determinadas por las relaciones intergranulares;	
4. Fracturación; longitud y tortuosidad del recorrido determinadas por la estratificación, por el absorción y la reactividad;	
5. Longitud y tortuosidad del recorrido determinadas por la estratificación, la granulometría, la absorción y la compactación;	
6. Longitud y tortuosidad del recorrido determinadas por la granulometría, la absorción y la compactación;	
7. Reactividad y fracturación	

Tabla 7 Valores de intensidad del factor C

Conductividad hidráulica (em s <sup>-1</sup> )	Puntuación
$5,0 \times 10^{-5} / 5,0 \times 10^{-3}$	1
$5,0 \times 10^{-3} / 1,5 \times 10^{-2}$	2
$1,5 \times 10^{-2} / 3,5 \times 10^{-2}$	4
$3,5 \times 10^{-2} / 5,0 \times 10^{-2}$	6
$5,0 \times 10^{-2} / 10^{-1}$	8
$> 10^{-1}$	10

Considerando que cada parámetro influye en el resultado final y esta influencia varía en función del tipo de actividad que se desarrolla en el área de estudio, para tener en cuenta estos efectos el modelo en cuestión preve la introducción, para cada parámetro de un valor multiplicativo (peso), que varía según el uso más o menos elevado de productos fitosanitarios. Estos valores están representados en la Tabla 8.

Tabla 8 Valores de los pesos multiplicadores

Parámetro	Pesos asignados áreas con productos fitosanitarios	Pesos asignados (condiciones normales)
D	5	5
R	4	4
A	3	3
S	5	2
T	3	1
I	4	5
C	2	3

El índice de vulnerabilidad (PP) se extrae mediante la suma de los productos de cada puntuación (r) por el peso relativo (w):

$$PP = Dr \times Dw + Rr \times Rw + Ar \times Aw + Sr \times Sw + Tr \times Tw + Ir \times Iw + Cr \times Cw$$

El mapa final sera generado escogiendo un intervalo de los valores PP al cuál le será asignado un valor de "riesgo" según los criterios expuestos en la Tabla 9.

Tabla 9 Clases de riesgo

26-71	Riesgo de contaminación muy bajo
72-117	Riesgo de contaminación bajo
118-163	Riesgo de contaminación moderado
164-209	Riesgo de contaminación elevado
210-256	Riesgo de contaminación muy elevado

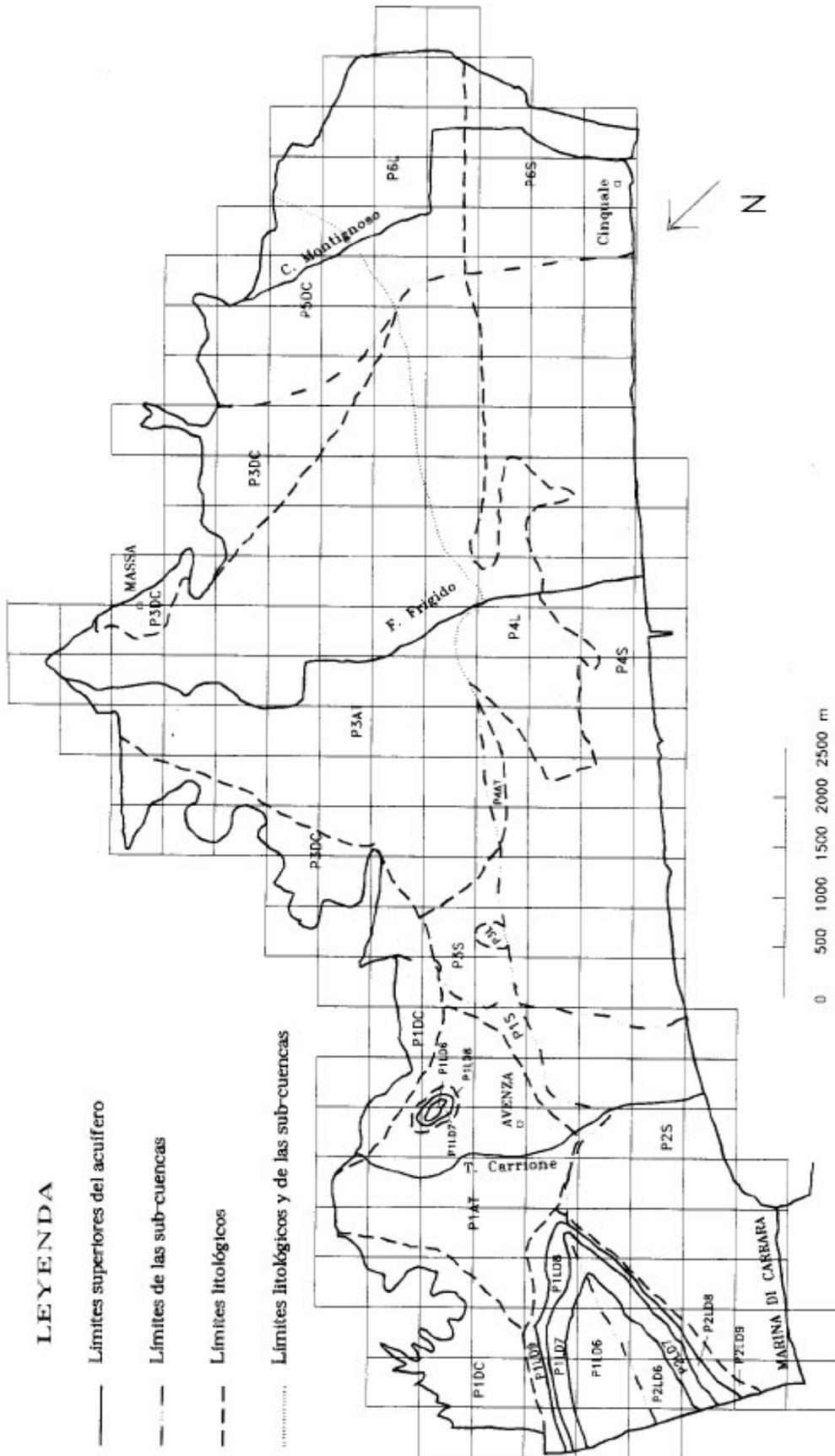


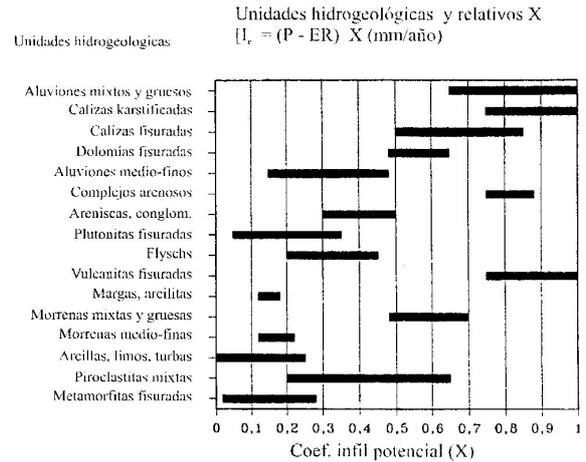
Figura 6 División en celdas según el modelo SINTACS y división en subzonas según el modelo DRASTIC del área de estudio

**EL MODELO SINTACS**

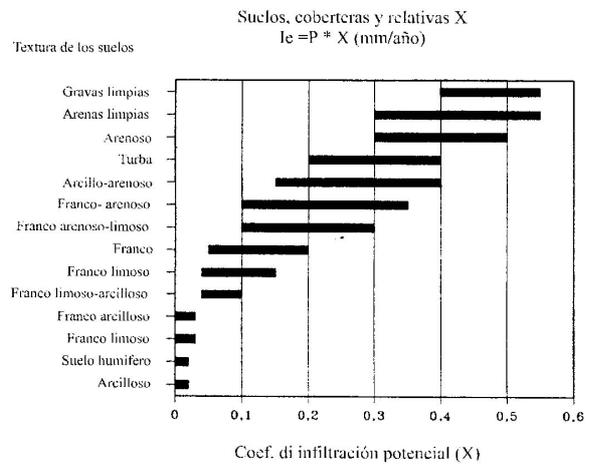
El modelo SINTACS se basa en la valoración de 7 parámetros y se aplica fraccionando el área de estudio, mediante una retícula de elementos finitos y cuadrados (EFC) con un lado apropiado a la escala de restitución; por lo general en los mapas la dimensión de la celda es de 0,5 km (Figura 6). La descripción y el significado de cada uno de los 7 parámetros se detalla a continuación (los gráficos proceden de Civita, 1994):

- 1) **S** (Soggiacenza). Representa la profundidad del acuífero y corresponde al parámetro D del DRASTIC. Las puntuaciones que se pueden asignar figuran en la Figura 7;
- 2) **I** (Infiltración). El valor de este parámetro se puede obtener siguiendo dos caminos distintos. La forma más rápida es mediante el cálculo del balance hidrogeológico que nos ofrece de inmediato los valores correspondientes a la infiltración eficaz en mm/año. La segunda posibilidad se basa en el cálculo de los valores de las precipitaciones eficaces en cada elemento de la retícula  $Q_m = P_m - E_{rm}$  (mm/año). Los valores obtenidos se multiplican por el índice correspondiente al tipo de roca (Figura 8).

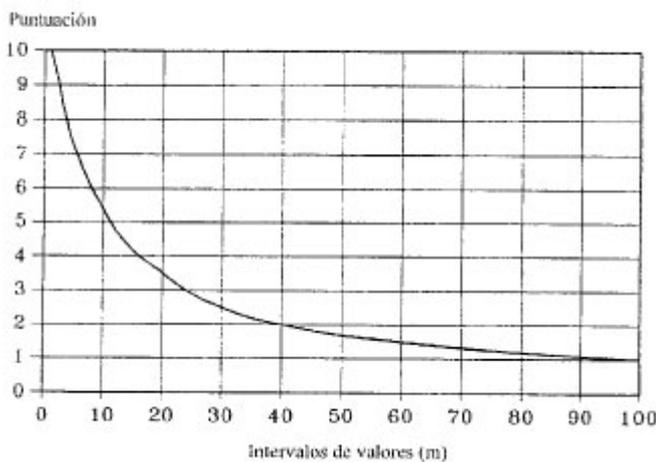
En el caso de que estuviera presente una capa muy gruesa de suelo el valor de la infiltración se obtiene multiplicando el valor interior de  $P_m$  por un índice extraído de la Figura 9; una vez calculado el valor de la infiltración eficaz mediante uno de los dos métodos, la puntuación relativa se deduce mediante el gráfico de Figura 10;



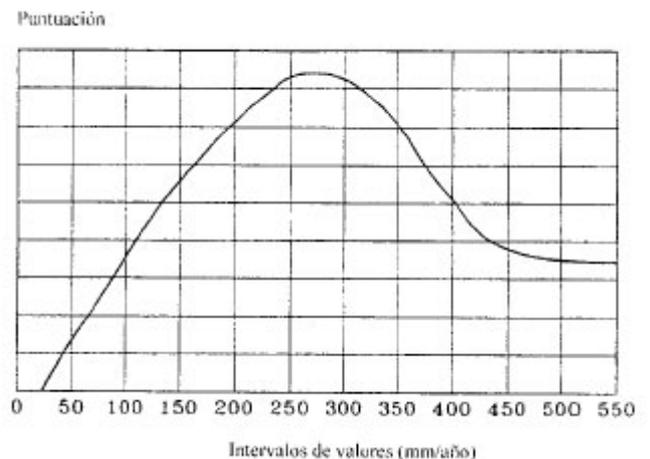
**Figura 8** Diagrama para el cálculo de la infiltración media anual (rocas y coberteras)



**Figura 9** Diagrama para el cálculo de la infiltración media anual (suelos)



**Figura 7** Profundidad del nivel freático(soggiacenza) y puntuaciones relativas



**Figura 10** Valores de la recarga activa y puntuaciones relativas

- 3) N (Efecto de autodepuración de la zonaNo saturada). La puntuación que hay que asignar al parámetro depende del litotipo que constituye la zona no saturada y se deduce mediante el gráfico de Figura 11 ;
- 4) T (Tipo de recubrimiento). La puntuación relativa depende de la textura del suelo y se obtiene mediante el gráfico de Figura 12. Para la elección del tipo de suelo se puede consultar, también para este método, el diagrama triangular ALA<sub>r</sub> de Figura 5.
- 5) A (Características litológicas del Acuífero). El valor de la puntuación depende del litotipo del acuífero y se deduce del gráfico de la Figura 13;

Suelos

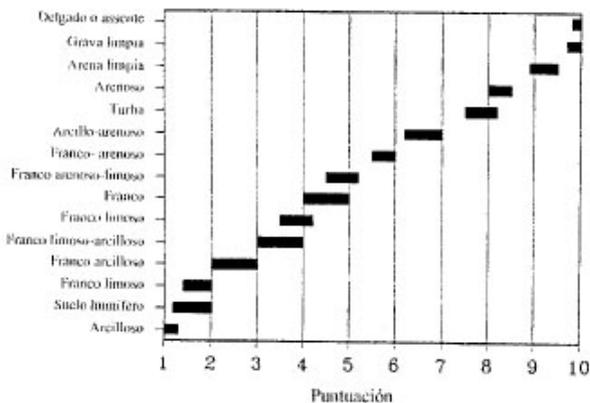


Figura 12 Efecto de mitigación de los Suelos

- 6) C (Conductividad hidráulica). La valoración de este parámetro presenta una cierta dificultad, sobre todo en zonas de montaña, en las cuales es nula o muy escasa la presencia de pozos para la medición de los valores de la conductividad hidráulica. El SINTACS ofrece, además de la posibilidad de utilizar los valores directos de la permeabilidad, un método de estimación indirecto que se basa en el sistema gráfico de la Figura 14. En la Figura 15 se representan los valores de la conductividad y las puntuaciones relativas;
- 7) S (Pendiente de la Superficie topográfica). El valor del parámetro depende de la pendiente topográfica. Para la puntuación correspondiente se utiliza el gráfico de Figura 16 en la que las pendientes han sido divididas en intervalos de valores según los porcentajes.

Unidades hidrogeológicas

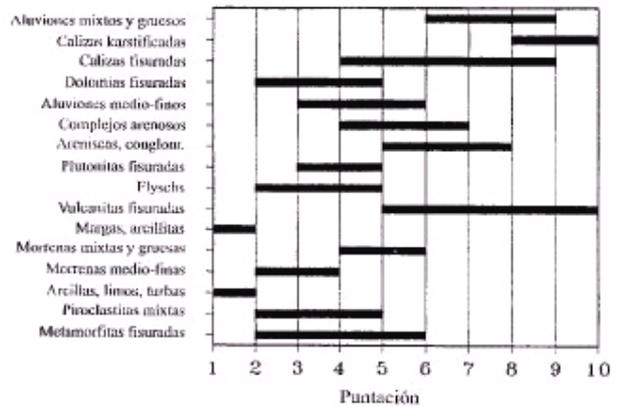


Figura 11 Efecto de autodepuración de la zona no saturada

Unidades hidrogeológicas

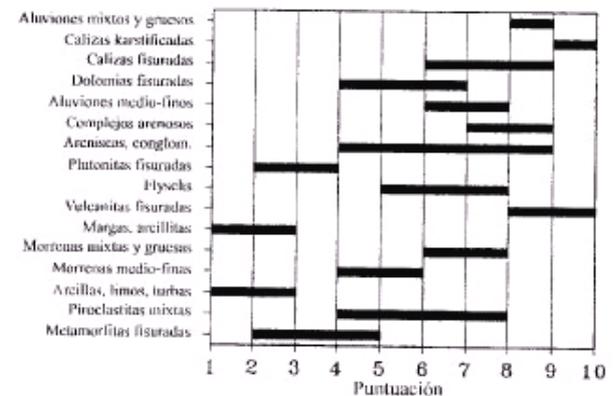


Figura 13 Puntuación relativa a las rocas constituyentes del acuífero

Unidades hidrogeológicas

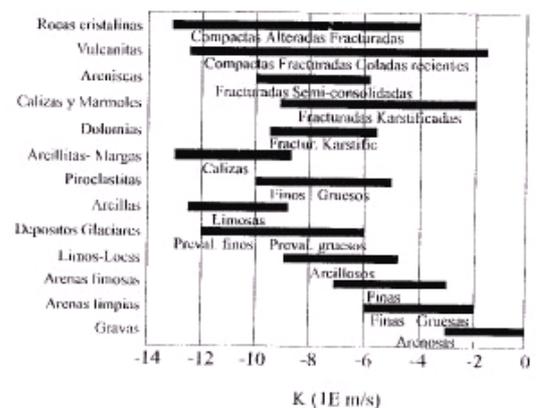


Figura 14 Conductividad hidráulica según las formaciones

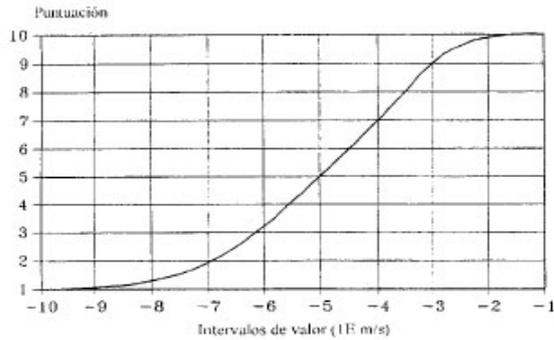


Figura 15 Valores de la conductividad hidráulica y puntuación relativa

Los procedimientos que tenemos que seguir en el método SINTACS se basan en la asignación de un valor a cada uno de los parámetros para todas las mallas en las cuales hemos dividido el área de estudio. También para este método cada parámetro debe ser multiplicado por una serie de "pesos" que, a diferencia del modelo DRASTIC, toma en consideración una de las cuatro situaciones que figuran a continuación:

- a) **ordinaria:** área estéril sin cultivar o con cultivos que no utilizan los fitosanitarios;
- b) **fuentes difusas** de contaminación potencial: áreas sujetas a uso abundante de productos fitosanitarios, efluentes orgánicos, depósitos de sedimentación y dispersión de aguas residuales, oleoductos, vertederos incontrolados, descargas de alcantarillas, áreas industriales activas o abandonadas;
- c) **drenaje** de cuerpos hídricos superficiales: áreas que dependen del retículo hidrográfico natural y/o artificial, incluidas las áreas de regadío con grandes volúmenes de agua;
- d) **karstificación** profunda: área fuertemente karstificada tanto en la superficie como en el subsuelo, con rápidas conexiones entre la superficie y el acuífero.

Tabla 10 Valores de los pesos multiplicadores para el SINTACS

Parámetro	Intervalo de pesos			
	Ordinaria	Fuentes difusas	Drenaje	Karstificación
S	5	5	4	2
I	4	5	4	5
N	5	4	4	1
T	2	5	2	3
A	3	3	5	5
C	3	2	5	5
S	1	2	2	5

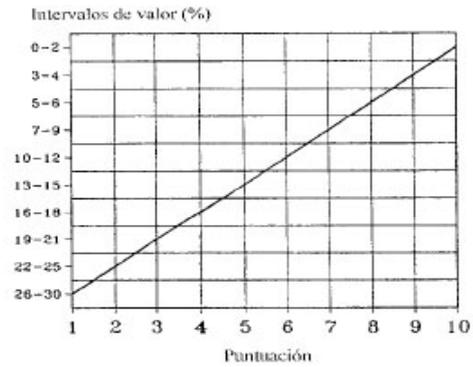


Figura 16 Pendiente topográfica v puntuación relativa

El abanico de los pesos multiplicadores que corresponden a cada una de estas situaciones es lo que figura en la Tabla 10.

El índice de vulnerabilidad intrínseco de cada malla se obtiene mediante la suma del valor de cada parámetro multiplicado por el peso relativo según la situación de la malla correspondiente:

$$INSINTACS = \sum_{j=1}^{n=7} (\text{Puntuación parámetro } j * \text{Peso } j)$$

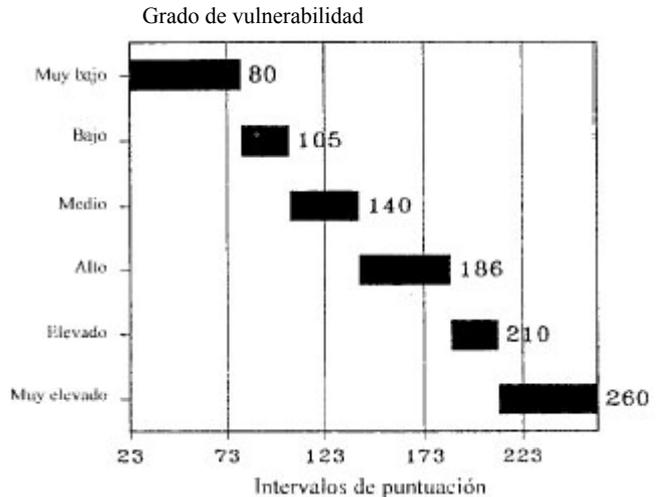


Figura 17 Intervalos de vulnerabilidad (puntuación bruta)

El valor obtenido en esta manera se introduce en el gráfico de Figura 17, así de este modo, se obtiene la clase de riesgo a la cual la malla pertenece; el gráfico de Figura 18 es parecido al de la figura anterior, con la única diferencia de que aquí las clases de riesgo se basan en un índice ( $I_{SINTACS}$ ) normalizado a 100.

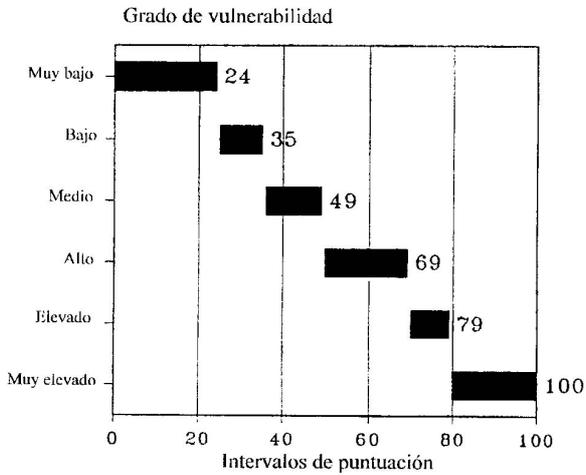


Figura 18 Intervalos de vulnerabilidad (puntuación normalizada)

**METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE LOS DATOS Y RESULTADOS**

La aplicación del modelo DRASTIC y SINTACS para la valoración del potencial de contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de la llanura Apuana se ha llevado a cabo mediante la subdivisión de toda el área de estudio en subáreas para el DRASTIC (Figura 6) y en una retícula de celdas cuadradas de 0,5 km de lado para el SINTACS (Figura 6). En particular la división en

subáreas para la aplicación del DRASTIC ha sido efectuada considerando las cuatro características fundamentales que no son constantes: la composición litológica del horizonte no saturado y del acuífero (1, A), la recarga activa de éste (R) y, por último, la profundidad del nivel del agua.

Para la aplicación del SINTACS el punto de partida ha sido la caracterización de cada malla con la precaución de que cuando una característica, en el interior de cada malla, toma 2 o más valores diferentes, se escoge el valor que, en el ámbito de la malla, corresponde a la superficie más amplia.

Las características geológicas han sido definidas después de un análisis detallado de los numerosos mapas existentes de la zona, mediante los cuales ha sido posible extraer toda la información necesaria relativa a la composición litológica del acuífero y de los sedimentos componentes la zona no saturada, así como la profundidad del acuífero principal. La recarga activa se ha obtenido mediante la elaboración de los datos pluviométricos de 10 estaciones meteorológicas presentes en el área y elaborados en los trabajos de Salvatori, 1994 y Salvatori y Spandre 1996. La conductividad hidráulica se ha deducido elaborando los datos provenientes de unos sondeos efectuados en el área, sobre las gravas y las arenas.

El examen de unas secciones geológicas nos ha permitido deducir los valores de los parámetros D (DRASTIC) y S (SINTACS) que se refieren a la profundidad del acuífero. En ambos modelos los valores correspondientes a este parámetro están comprendidos entre un mínimo de 6, en el caso de que el acuífero se sitúe a una profundidad de 10 m, y pasando por todos los valores intermedios, alcanzan un máximo de 10 cuando el acuífero se eleva casi al nivel del suelo.

Tabla 11 Valoración de la recarga activa y puntuación relativa DRASTIC y SINTACS

Zonas	Infiltración eficaz (m <sup>3</sup> / año)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Recarga activa(mm / año)	Puntuación DRASTIC	Puntuación SINTACS
P <sub>1</sub>	3.203.075	8.014.583,3	399	9	6
P <sub>2</sub>	923.562	6.010.416,6	153	6	7
P <sub>3</sub>	6.513.832	15.191.666,0	428	9	6
P <sub>4</sub>	2.409.734	14.077.883,0	177	7	7
P <sub>5</sub>	1.420.411	2.432.812,5	583	9	4
P <sub>6</sub>	968.07	5.848.437,8	165	7	7

P<sub>1</sub> llanura alta Torrente Carrione; P<sub>2</sub> llanura baja Torrente Carrione; P<sub>3</sub> llanura alta Río Frigido; P<sub>4</sub> llanura baja Río Frigido; P<sub>5</sub> llanura alta Canal Montignoso; P<sub>6</sub> llanura baja Canal Montignoso.

Por lo referente a la recarga activa (parámetro **R** en el **DRASTIC** y **I** para el **SINTACS**), se ha repartido toda la superficie en tres cuencas, cada una de ellas perteneciente a un curso de agua que la atraviesa: desde NO hacia SE tenemos la cuenca del Torrente Carrione, la cuenca del Rio Frigido y finalmente la del canal Montignoso. Cada cuenca posee una parte montañosa y una de llanura (esta última es la estudiada en el presente trabajo). La parte de llanura, a su vez, según sus diferentes coeficientes de infiltración, ha sido dividida en dos zonas denominadas de alta y baja llanura; de este modo el área entera resulta dividida en 6 subáreas. Utilizando los datos relativos a la infiltración eficaz y midiendo en el mapa las superficies efectivamente ocupadas, se ha calculado por cada subárea el valor de la recarga activa. Para la aplicación del **DRASTIC** ha sido suficiente asignar una puntuación correspondiente a cada uno de los 6 valores de la recarga activa. En la Tabla 11 figuran los valores de la infiltración eficaz, las superficies ocupadas por cada subárea, los valores correspondientes a la recarga activa y las puntuaciones relativas a los modelos **DRASTIC** y **SINTACS**.

Al parámetro **A** (**DRASTIC** y **SINTACS**) que se refiere a la litología del acuífero le han sido asignados dos valores:

**9** para las zonas en las cuales el acuífero está compuesto casi todo por gravas;

**8** para las zonas donde la parte superior del acuífero está recubierta por arenas

Los parámetros **1** (**DRASTIC**) y **N** (**SINTACS**) relativos a la litología de la zona no saturada, adquieren, en correspondencia de las mismas litologías, puntuaciones distintas en los dos métodos según la tabla siguiente:

**9** en las cuales están presentes las mismas gravas del acuífero (**AT** en el mapa);

**8** en las zonas en las cuales afloran las arenas (**S**);

**6** en las áreas de piedemonte en las cuales se localizan los depósitos detrítico-coluviales (**DC**);

**1** donde existe un recubrimiento arcilloso.

En la tabla a pie de página se representan los valores de los índices de las litologías correspondientes a los dos modelos.

La conductividad hidráulica (parámetro **C**) ha sido estimada en alrededor de  $10^{-1}$  cm/s para las gravas y de  $1,5 \times 10^{-2}$  cm/s para las arenas. Considerando que en nuestro caso, como ya dijimos, el acuífero principal está localizado en las gravas, es posible omitir la variación de la conductividad en las zonas en las cuales están presentes también las arenas y por lo tanto considerar constante en toda el área el valor de  $10^{-1}$  cm/s, con una puntuación de **8** para el modelo **DRASTIC** y **10** para el **SINTACS**.

Los datos disponibles indican, para concluir, una casi total ausencia o un espesor muy reducido del suelo, además de una pendiente topográfica constante alrededor de  $1^\circ$ , por lo cual a los parámetros correspondientes a estas dos características, respectivamente **S** (**DRASTIC**) y **T** (**SINTACS**) para el tipo de suelo, y **T** (**DRASTIC**) y **S** (**SINTACS**) para la pendiente de la superficie topográfica se les ha asignado el valor de **10** en ambos métodos.

## DESCRIPCIÓN DE LAS SUBÁREAS Y RESULTADOS DEL MÉTODO DRASTIC

### Cuenca del Torrente Carrione

Está dividida en dos subcuencas  $P_1$  y  $P_2$  según los distintos valores de la infiltración eficaz (**I**). La cuenca más septentrional ( $P_1$ ) incluye una zona de piedemontes en la cuál están presentes los depósitos detrítico-coluviales ( $P_1DC$ ), una zona de aluviones de terrazas ( $P_1AT$ ) y una pequeña zona arenosa ( $P_1S$ ). Hacia el extremo noroccidental y en una pequeña porción oriental de la cuenca, existen unos lentejones arcillosos que alcanzan un espesor máximo de unos diez metros. Según el valor del espesor se han localizado otras cuatro zonas:  $P_1LD_6$ ,  $P_1LD_7$ ,  $P_1LD_8$  y  $P_1LD_9$  cuando las arcillas están por encima de las gravas. La cuenca  $P_2$  está situada a lo largo de la costa y está recubierta en su casi totalidad por sedimentos arenosos ( $P_2S$ ). Como en la cuenca  $P_1$  aquí también tenemos la presencia de reducidas áreas arcillosas que nos permiten separar las subáreas  $P_2LD_6$ ,  $P_2LD_7$ ,  $P_2LD_8$ ,  $P_2LD_9$ .

**Tabla 10** Valores de las litologías de los dos modelos

LITOLOGÍA	I (DRASTIC)	N (SINTACS)
Gravas ( <b>AT</b> )	9	8
Arenas ( <b>S</b> )	8	6
Detritos ( <b>DC</b> )	6	5
Arcillas( <b>L</b> )	1	1

### Cuenca del Rio Frigido

Es la cuenca más grande de las tres; también ésta se ha dividido en dos subcuencas: P<sub>3</sub> y P<sub>4</sub>. En la parte más interna tenemos los depósitos detríticoluviales (P<sub>3</sub>DC), los depósitos aluviales (P<sub>3</sub>AT) y las arenas, mientras que la zona costera posee una componente prevalentemente arenosa (P<sub>4</sub>S) con una pequeña área de depósitos aluviales (P<sub>4</sub>AT). La cuenca del Rio Frigido, como la del Torrente Carrione, presenta en algunos sitios lentejones arcillosos que alteran en parte los parámetros y nos permiten evidenciar otras dos sub-áreas: P<sub>3</sub>L y P<sub>4</sub>L.

### Cuenca del Canal Montignoso

Es la cuenca más pequeña y, como las otras dos, ha sido dividida en dos partes P<sub>5</sub> y P<sub>6</sub>. La primera está compuesta casi exclusivamente por depósitos detrítico-coluviales (P<sub>5</sub>DC), mientras que la segunda está compuesta por una fracción oriental, en la que están superpuestos unos sedimentos arcillosos a las gravas (P<sub>6</sub>L), y una costera en la cual, al techo de las gravas se encuentran las arenas (P<sub>6</sub>S).

Los resultados finales están descritos en la Tabla 11, en la que cada línea indica una de las áreas descritas en el párrafo anterior, mientras que en las columnas figuran los valores de los siete parámetros del modelo (Dr, Rr, etc.). Además, en la misma tabla (columnas 9 - 15) están presentes los productos (Dw, Rw, etc.) del valor de cada parámetro por su peso relativo. La última columna (16), representa el valor total del índice de vulnerabilidad: **PP**.

Hay que hacer una observación con respecto al valor de la puntuación asignada a la conductividad hidráulica. El valor 8 de este parámetro ha sido considerado constante en toda el área de estudio por dos razones: la primera porque en él se identifica el acuífero principal, como ya se ha explicado anteriormente, la segunda es que escogiendo la opción más desfavorable se obtiene una sobrestimación del riesgo, por lo que se nos ofrece un margen de protección más amplio para actuar.

En conclusión, comparando los valores de PP de la Tabla 11 con los de la 9, podemos afirmar que la totalidad del área de la llanura Apuana, considerada en el presente estudio, se puede dividir en dos clases de riesgo de contaminación: la parte de piedemonte y la costera resultan estar expuestas a un factor de riesgo muy elevado, mientras que por la zona intermedia el riesgo pasa a ser elevado (Figura 19).

### RESULTADOS DEL MODELO SINTACS

La totalidad del área considerada se ha dividido en 253 celdas (EQF), a cada una de ellas se han asignados las puntuaciones relativas a los 7 parámetros del modelo. Para cada celda se multiplica la puntuación de cada parámetro por el coeficiente de "peso" equivalente al caso de "fuentes difusas de contaminación"; sólo en las mallas que coinciden con los cauces del Torrente Carrione, Rio Frigido y Canal Montignoso las puntuaciones relativas se multiplican por el coeficiente que corresponde a la "situación de drenaje". La suma de todos los valores calculados para cada celda nos ofrece el valor del índice de la vulnerabilidad ISINTACS, según el cual asignaremos el valor de la vulnerabilidad.

Como se puede observar en la Figura 20 las celdas con igual grado de vulnerabilidad se han reunido para formar zonas con una extensión muy variable y que corresponden a las tres clases de riesgo calculadas. El área con riesgo muy elevado, que es la más extendida, corresponde a las zonas de arenas y gravas; las zonas con riesgo elevado coinciden con las áreas con recubrimiento arcilloso, así como una pequeña área con alto riesgo.

En la misma figura los límites entre las zonas con un grado diferente de riesgo siguen más los límites reales que el contorno de las mallas, de este modo el mapa final representa, mejor, la situación real y se puede comparar directamente con el realizado mediante el método DRASTIC.

### CONCLUSIONES

Comparando los dos mapas finales (Figuras 19 y 20) se puede observar que, a pesar de haber seguido dos metodologías distintas, las zonas con el mismo nivel de riesgo resultan coincidir en manera casi absoluta. Hay una sola diferencia apreciable en una zona, que ha sido localizada en el modelo DRASTIC, en la cuál el riesgo resulta ser ligeramente inferior a lo calculado con el SINTACS. Este hecho pone en evidencia como esta última metodología es la más indicada para los estudios de este tipo en la cuenca mediterránea, siendo el DRASTIC más indicado para el área norteamericana.

Por lo general se puede afirmar que estos tipos de modelos ofrecen unos resultados comparables con una situación real de contaminación, por lo tanto pueden representar una ayuda adicional durante la fase de investigación preliminar relativa a la valoración del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en un determinado sector.

ZONA S	Dr	Rr	Ar	Sr	TR	Ir	Cr	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw	PP
P <sub>1</sub> DC	10	9	9	10	10	6	8	50	36	27	50	30	24	16	233
P <sub>1</sub> AT	10	9	9	10	10	9	8	50	36	27	50	30	36	16	245
P <sub>1</sub> S	10	9	8	10	10	8	8	50	36	24	50	30	32	16	238
P <sub>1</sub> LD <sub>6</sub>	6	9	9	10	10	1	8	30	36	27	50	30	4	16	193
P <sub>1</sub> LD <sub>7</sub>	7	9	9	10	10	1	8	35	36	27	50	30	4	16	198
P <sub>1</sub> LD <sub>8</sub>	8	9	9	10	10	1	8	40	36	27	50	30	4	16	203
P <sub>1</sub> LD <sub>9</sub>	9	9	9	10	10	1	8	45	36	27	50	30	4	16	208
P <sub>2</sub> S	10	6	8	10	10	8	8	50	24	24	50	30	32	16	226
P <sub>2</sub> LD <sub>6</sub>	6	6	8	10	10	1	8	30	24	24	50	30	4	16	178
P <sub>2</sub> LD <sub>7</sub>	7	6	8	10	10	1	8	35	24	24	50	30	4	16	183
P <sub>2</sub> LD <sub>8</sub>	8	6	8	10	10	1	8	40	24	24	50	30	4	16	188
P <sub>2</sub> LD <sub>9</sub>	9	6	8	10	10	1	8	45	24	24	50	30	4	16	193
P <sub>3</sub> DC	10	9	9	10	10	6	8	50	36	27	50	30	24	16	233
P <sub>3</sub> AT	10	9	9	10	10	9	8	50	36	27	50	30	36	16	245
P <sub>3</sub> S	10	9	8	10	10	8	8	50	36	24	50	30	32	16	238
P <sub>3</sub> L	9	9	9	10	10	1	8	45	36	27	50	30	4	16	208
P <sub>4</sub> AT	10	7	9	10	10	9	8	50	28	27	50	30	36	16	237
P <sub>4</sub> S	10	7	8	10	10	8	8	50	28	24	50	30	32	16	230
P <sub>4</sub> L	9	7	8	10	10	1	8	45	28	24	50	30	4	16	197
P <sub>5</sub> DC	10	9	9	10	10	6	8	50	36	27	50	30	24	16	233
P <sub>6</sub> L	9	9	9	10	10	1	8	45	36	27	50	30	4	16	208
P <sub>6</sub> S	10	7	8	10	10	8	8	50	28	24	50	30	32	16	230

Tabla 12. Valores de las intensidades pesadas y del índice DRASTIC para las subáreas examinadas

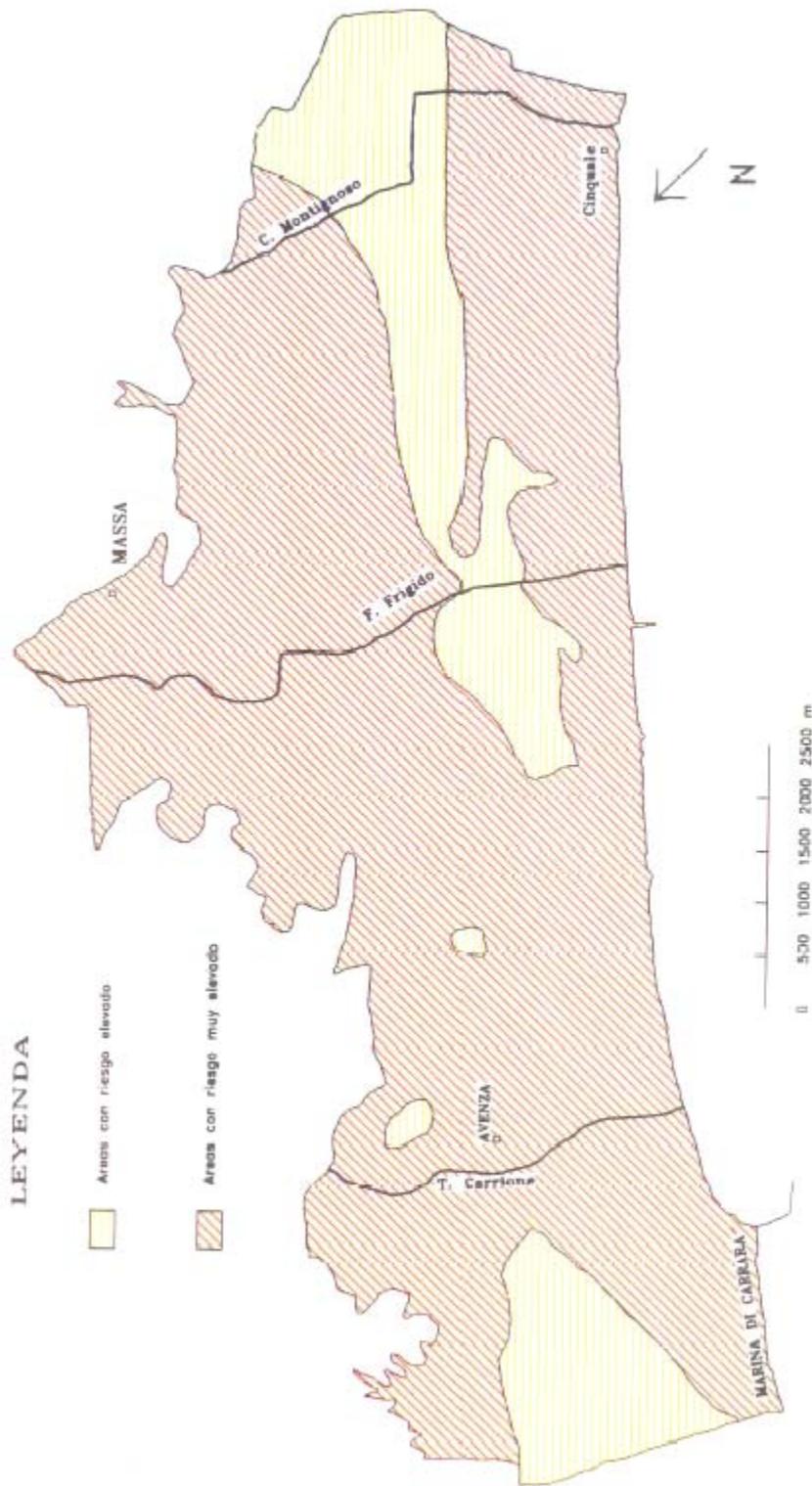


Figura 19 Areas de riesgo según el modelo DRASTIC

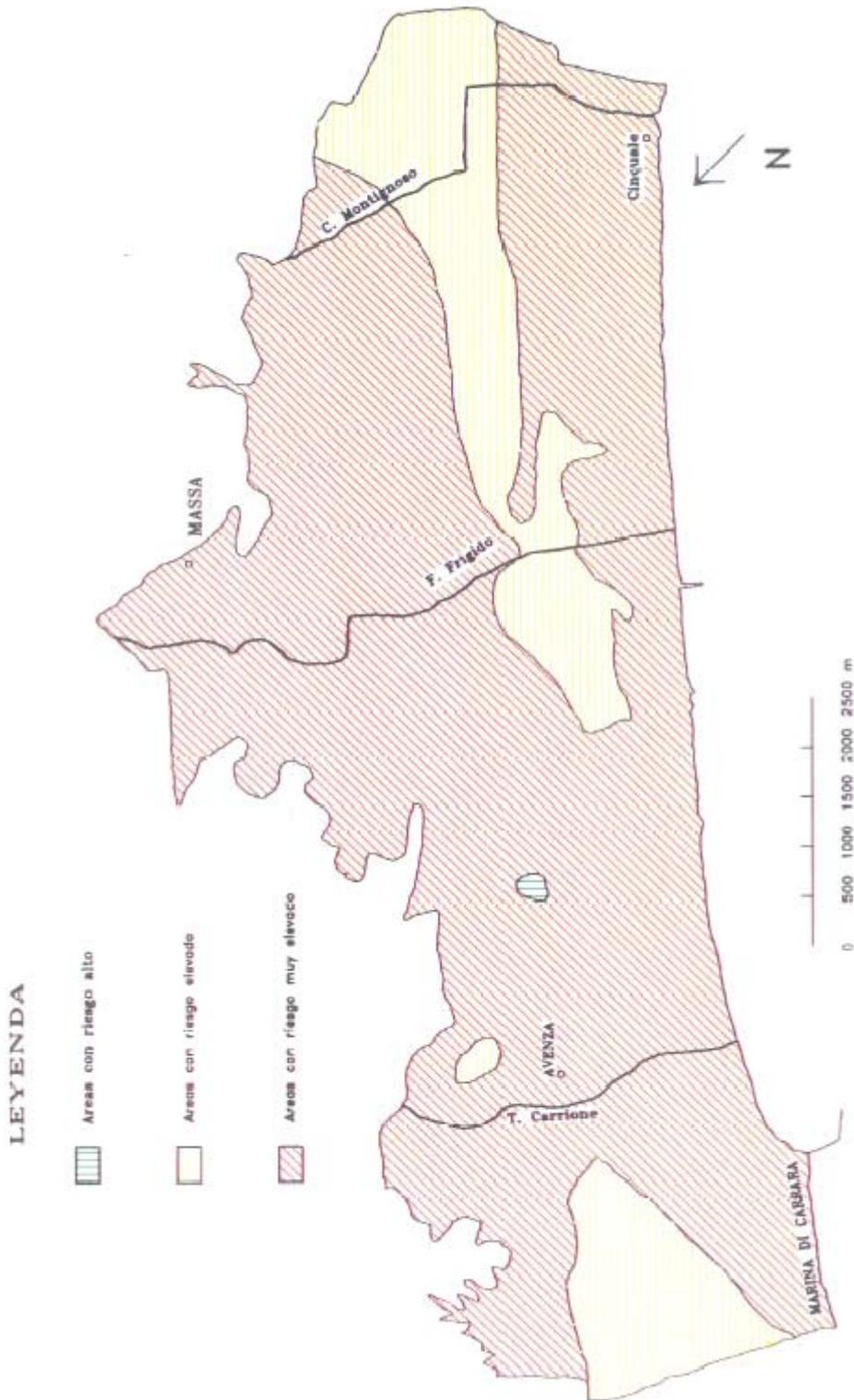


Figura 20 Areas de riesgo segun el modelo SINTACS

**REFERENCIAS**

- Aller L., Bennet t., Lehr J.H., Petty R.J., Hackett G. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. NWWA/EPA Ser., 600/2-87-035, 455 pp.
- Civita M. (1994) Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. Pitagora Editrice Bologna 325 pp.
- OCSE (1987) Acque inquinate. Franco Muzio Editore, Padova.
- Persicani D., De Santi M., Gasparetti G., Siro P. ( 1991 ) Rischio di inquinamento idrico da nitrati. valutazione della pianura piacentina con il modello DRASTIC. Geologia Técnica 2/91, 41-47.
- Salvatori I. (1994) La falda e le caratteristiche fisico-chimiche delle acque della pianura apuana. Università di Pisa, Tesis en Ciencias Geológicas (inérita).
- Salvatori I., Spandre R. (1996) Aspetti idrogeologici ed idrochimici della pianura apuana. Atti Società Toscana di Scienze Naturali (in press)
- Sestini A.( 1950) Un 'antica ripa marina nella pianura costiera Apuana. Att. Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. 57, 1-5