



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TESIS DOCTORAL

EL MAPA ESPAÑOL DE RADÓN:

Análisis de factores indicativos del riesgo de exposición al radón



Alicia Fernández Villar

Santander
2017



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TESIS DOCTORAL

**EL MAPA ESPAÑOL DE RADÓN:
ANÁLISIS DE FACTORES INDICATIVOS DEL
RIESGO DE EXPOSICIÓN AL RADÓN**

Alicia Fernández Villar

Santander

2017



CARLOS SAINZ FERNÁNDEZ, Profesor Titular de Radiología y Medicina Física del Departamento de Ciencias Médicas y Quirúrgicas de la Universidad de Cantabria.

JUAN REMONDO TEJERINA, Profesor Titular de Geodinámica Externa del Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de la Universidad de Cantabria.

CERTIFICAN

Que el presente trabajo titulado: **“El Mapa Español de Radón: Análisis de factores indicativos del riesgo de exposición al radón”** ha sido desarrollado por **Dña. ALICIA FERNÁNDEZ VILLAR** bajo su supervisión, y que reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Y para que conste a todos los efectos oficiales, firma el presente certificado en Santander a 21 de Abril de 2017.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado a la realización de la presente tesis.

Al Dr. Luis Santiago Quindós Poncela, director del Grupo Radón, por haberme dado la oportunidad de trabajar en su grupo de investigación y permitirme aprender de sus conocimientos. Gracias por tu comprensión, paciencia y el ánimo recibido a lo largo de estos años.

Al Dr. Carlos Sainz Fernández, director de esta tesis, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma. Gracias por tu disponibilidad, paciencia y por tus sugerencias e ideas tanto en el proceso de elaboración de la tesis como en el día a día del laboratorio.

Al Dr. Juan Remondo Tejerina, codirector de esta tesis, por su importante aporte y participación activa en el desarrollo del trabajo. Gracias por tu interés y la atención que siempre has prestado.

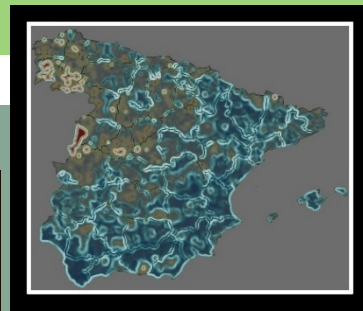
Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros del Departamento de Física Médica sin los cuales hubiese sido imposible la realización de esta tesis. Gracias por vuestra contribución y ayuda.

Del mismo modo quiero agradecer a los miembros de la Subdirección de Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear la información proporcionada y las facilidades mostradas a lo largo del desarrollo del trabajo.

Por último, pero no menos importante, un agradecimiento muy especial a mi familia y a todas aquellas personas que han estado presentes en mi camino.

A todos ellos, muchas gracias.

ÍNDICE



	Pág.
CAPÍTULO 0- OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO	6
CAPÍTULO 1-INTRODUCCIÓN	
1. APROXIMACIÓN A LAS RADIACIONES IONIZANTES	7
1.1 Fuentes naturales y artificiales de radiación ionizante	8
2. ¿QUÉ ES EL RADÓN?	11
2.1 La producción del ^{222}Rn	12
2.1.1 El paso del radón a los poros del terreno (emanación)	12
2.1.2 El transporte del radón	13
2.2 Factores que favorecen la aparición del ^{222}Rn en el interior de las viviendas	14
2.2.1 Características de las edificaciones y hábitos de sus ocupantes	14
2.2.2 Factores ambientales	17
2.2.3 Factores geológicos: presencia de ^{226}Ra en la roca o suelo. Rocas y minerales con alto contenido en ^{238}U	18
2.3 Regiones geológicas en España y su relación con el ^{222}Rn	25
2.3.1 Macizo Ibérico	25
2.3.2 Dominio de las cadenas alpinas	26
2.3.3 Cuencas continentales	27
2.3.4 Rocas de origen volcánico	27
3. LOS MAPAS DEL RADÓN	29
3.1 Mapas europeos y americanos del radón	29
3.3.1 Mapas americanos: EE.UU	29
3.3.2 Mapas europeos	30

3.2 El Mapa Español del Radón	33
3.2.1 Antecedentes: El Proyecto MARNA	34

CAPÍTULO 2-METODOLOGÍA

1. OBTENCIÓN Y GESTIÓN DE LOS DATOS	39
1.1 Introducción	39
1.2 Análisis descriptivo de los datos: Estadística descriptiva	41
1.3 Análisis/ Tratamiento de los datos espaciales	42
1.3.1 Métodos de interpolación	42
1.3.2 La lógica booleana	44
1.4 Análisis de regresión	44
1.4.1 Análisis de regresión simple: Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) y coeficiente de determinación (R ²)	45
2. CARTOGRAFÍA DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS	47
2.1 Concentración de ²²²Rn en aire: El sistema europeo de celdas 10x10 km². Mapa Español de Concentración de ²²²Rn.	47
2.1.1 Marco de trabajo: Definición del sistema de referencia y creación de malla 10x10 km ²	51
2.1.2 Obtención de las medidas	52
1. Criterios de muestreo	53
2. Medidas de exposición al radón en las viviendas	58
2.1.3 Almacenamiento de los datos	60
2.1.4 Representación espacial de los datos	62
1. Elección del tamaño de píxel y campo a modelizar	63

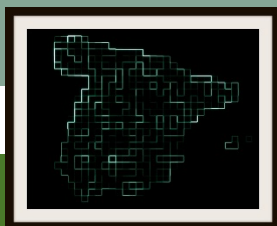
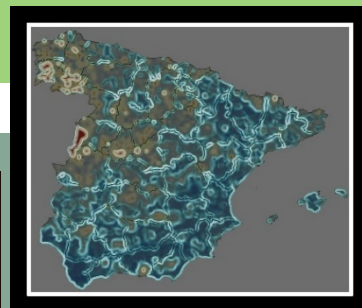
2. Elección del método de interpolación	63
3. Elaboración del modelo de interpolación de radón: Validación independiente de los datos	63
2.2 Tasa total de exposición a la radiación gamma natural	64
2.2.1 Concentración estimada de ^{226}Ra en suelos	66
2.3 Presencia de yacimientos de uranio	68
2.4 Presencia de fallas	69
2.5 Presencia de materiales arcillosos	71
2.6 Presencia de materiales del cuaternario	75
2.7 Presencia de formaciones kársticas	76
2.8 Unidades litoestratigráficas a escala 1:200,000	78
2.8.1 Estudio según el origen petrológico de las unidades litoestratigráficas	79
2.8.2 Estudio según la permeabilidad de las unidades litoestratigráficas	82
2.8.3 Estudio según el tipo de unidad litoestratigráfica	85
1. Litoestratigrafías con presencia potencial al radón	86
2. Unidades litoestratigráficas vinculadas con el radón	88
2.9 Unidades geológicas a escala 1:1,000,000	90
2.9.1 Estudio según tipología litológica	90
2.9.2 Estudio según las edades geológicas de los materiales	91
2.9.3 Estudio según las formaciones superficiales y del substrato	92

CAPÍTULO 3- RESULTADOS

1.CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn EN AIRE: SISTEMA EUROPEO DE CELDAS 10x10 Km². MAPA ESPAÑOL DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn.	94
1.1. Mapa de medidas directas de concentración de ^{222}Rn	94
1.2 Mapa interpolado de concentración de ^{222}Rn	101
1.2.1. Elección del tamaño de píxel y campo a modelizar	101
1.2.2 Elección del método de interpolación	103
1.2.3 Elaboración del modelo de ^{222}Rn mediante interpolación: Validación independiente de los datos	106
2.TASA TOTAL DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL	114
2.1 Mapa de medidas directas de tasa total de exposición a la radiación gamma natural	114
2.2 Mapa interpolado de tasa total de exposición a la radiación gamma natural	116
2.3 Concentración estimada de ^{226}Ra en suelos	122
2.3.1 Mapa de medidas directas de concentración estimada de ^{226}Ra en suelos	122
2.3.2 Mapa interpolado de concentración estimada de ^{226}Ra en suelos	124
3. PRESENCIA DE YACIMIENTOS DE URANIO	126
4. PRESENCIA DE FALLAS	129
5. PRESENCIA DE MATERIALES ARCILLOSOS	132
6. PRESENCIA DE MATERIALES DEL CUATERNARIO	135
7. PRESENCIA DE FORMACIONES KÁRSTICAS	138
8. UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS A ESCALA 1:200,000	141
8.1 Origen petrológico de las unidades litoestratigráficas	143
8.2 Permeabilidad de las unidades litoestratigráficas	155

8.3 Tipos de unidad litoestratigráfica	165
8.3.1. Estudio de zonas con presencia potencial de ^{222}Rn	166
8.3.2. Estudio de las unidades litoestratigráficas vinculadas al ^{222}Rn	169
8.3.3. Estudio combinado de las unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn	173
9. UNIDADES GEOLÓGICAS A ESCALA 1:1,000,000	179
9.1 Tipologías litológicas	179
9.2 Edades geológicas de los materiales	184
9.3 Formaciones superficiales y del substrato	187
CAPÍTULO 4- CONCLUSIONES	192
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	194
ANEXOS	
1. Anexo Normativa	203
2. Anexo Tablas	211
3. Anexo Mapas	225

OBJETIVOS GENERALES



0

OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO

En nuestro planeta aparecen elementos radiactivos de origen natural presentes en el aire, agua y suelos. El ^{222}Rn es un gas inerte de origen natural, incoloro, inodoro e insípido, que no entraña peligro, y que procede de la cadena de desintegración del ^{226}Ra y a su vez forma parte con éste de la cadena de desintegración del ^{238}U .

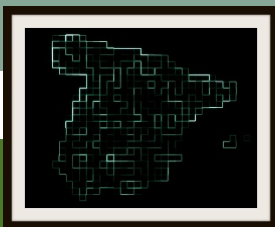
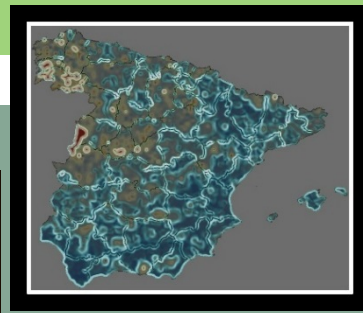
La peligrosidad del radón se relaciona con su carácter radiactivo que hace que sus descendientes de vida corta (^{218}Po y ^{214}Po), de carácter sólido y emisores alfa se vinculen a las partículas presentes en el aire y sean incorporados por inhalación al organismo, fijándose en los distintos tramos del aparato respiratorio, especialmente en la zona pulmonar.

En 1988, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), incluyó al radón en la categoría principal de agentes cancerígenos (IARC, 1988), y según la Organización Mundial de la Salud, el radón es el responsable de entre el 3% y el 14% de las muertes por cáncer de pulmón en países desarrollados (WHO, 2009; IAEA, 2011). Este gas, es la principal fuente de radiación ionizante de tipo natural a la que están sometidos los seres vivos (contribuye en un 47 % a la dosis efectiva anual recibida) (NRPB; 1981).

Numerosos estudios (Darby et al, 2006; Sainz et al, 2009, ICRP 2010; 2011) han confirmado la relación entre la exposición al radón en el ámbito residencial y el incremento del riesgo de sufrir cáncer de pulmón, pues el radón al aire libre presenta bajas concentraciones, mientras que en el interior de edificaciones y lugares cerrados se puede dar el caso de que aparezcan concentraciones elevadas. De ahí la importancia de localizar geográficamente zonas en las que exista una mayor probabilidad de encontrar viviendas con altas concentraciones de radón.

El presente trabajo tiene como objetivo principal identificar regiones con altas concentraciones de ^{222}Rn residencial en España mediante la realización de mapas por procedimientos geoestadísticos y basándose en el análisis espacial de los datos de una serie de variables relacionadas con la presencia del radón en el interior de las viviendas.

INTRODUCCIÓN



1

APROXIMACIÓN A LAS RADIACIONES IONIZANTES

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones). La desintegración espontánea de los átomos se denomina radiactividad, y la energía excedente emitida es una forma de radiación ionizante. Los elementos inestables que se desintegran y emiten radiación ionizante se denominan radionúclidos. (WHO; 2009)

Los efectos biológicos de estas radiaciones ionizantes sobre el organismo son de diferente tipo, puesto que afectan al comportamiento químico de las células, las cuales pueden regenerarse o bien pueden ser irremediablemente dañadas. También hay que tener en cuenta que el daño que causa la radiación ionizante en los órganos y tejidos dependerá de múltiples factores: de la dosis total recibida, de la clase y la energía de la radiación, de que ésta proceda de fuentes externas o hayan sido incorporadas al organismo, de que haya afectado al cuerpo en su totalidad o sólo a determinados órganos, y finalmente al tiempo total de irradiación. (Quindós Poncela, L.S; 1995)

De este modo y analizando todos estos parámetros, sus efectos se clasificarán en dos tipos: los efectos estocásticos y los efectos no estocásticos (deterministas). Los efectos estocásticos son efectos basados en lesiones celulares subletales, cuya probabilidad de aparición aumenta con la dosis recibida. Pero la gravedad del efecto no dependerá de la dosis recibida, pues cualquier dosis aunque sea mínima podrá desencadenar dichos efectos, sino que lo que aumenta es la probabilidad de que el efecto ocurra. Para este tipo de efectos se considera que no existe una dosis umbral, por debajo de la cual pueda afirmarse que la probabilidad de aparición del efecto es nula. Los efectos estocásticos suelen estar asociados a bajas tasas de dosis, definiéndose como tales las tasas a partir de las cuales resulta improbable que ocurra más de un evento de absorción de energía de la radiación en las partes críticas de la célula antes de que puedan actuar en ella los mecanismos de reparación (UNSCEAR; 2000). Estos efectos pueden ocurrir en células somáticas generando cáncer o bien en células germinales generando enfermedades hereditarias.

Por otro lado, los efectos deterministas son aquellos que se deben a lesiones letales en un número significativo de células de un determinado tejido u órgano, y presentan una relación causa-efecto generalmente lineal, es decir, a mayor dosis recibida mayor es la severidad de los efectos generados. Existe una dosis umbral a partir de la cual se manifiestan los efectos en la totalidad o en parte del organismo. Debido a esto, los principios de protección radiológica establecen unos límites de dosis bastante alejados de la dosis umbral, por lo que este tipo de efectos deterministas solo caben que aparezcan en el caso de exposiciones accidentales.

1.1

FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES DE RADIACIÓN IONIZANTE

Dependiendo de cuál sea su origen, existen dos tipos de radiaciones ionizantes a las cuales están sometidos los seres vivos: son las radiaciones de origen natural y las de origen artificial. (Figura 1)

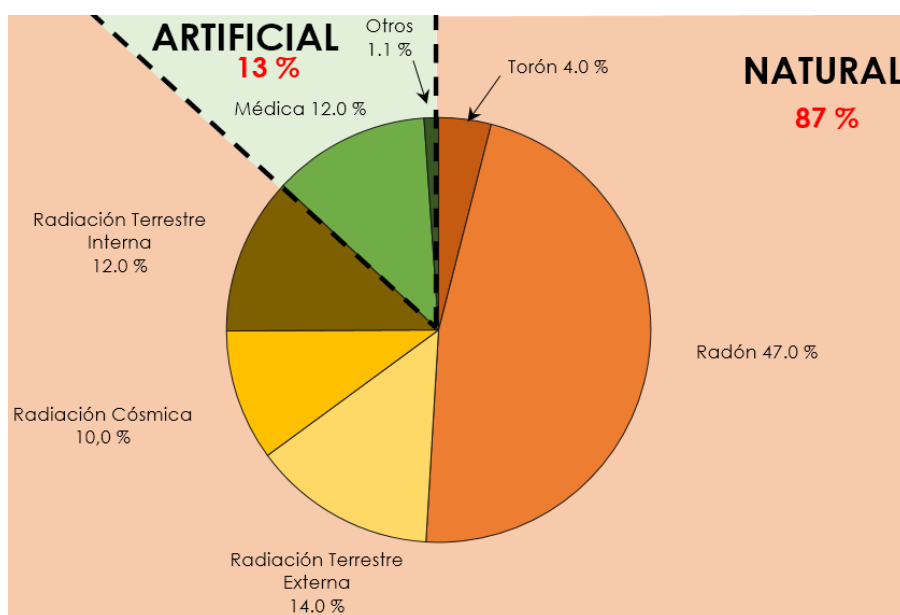


Figura 1: Contribución de las radiaciones naturales y artificiales a la dosis recibida por la población. Elaboración propia. Fuente (NRPB; 1981)

Las fuentes artificiales de radiación son aquellas generadas por las actividades humanas generando isótopos producidos artificialmente por reacciones nucleares. Según el UNSCEAR las mayores dosis de este tipo (el 12 %) que recibe la población provienen de pruebas médicas como son la radioterapia y radiodiagnóstico (UNSCEAR; 2000). La proporción de las dosis recibidas como consecuencia de la precipitación

radiactiva generada en pruebas de armamento nuclear o accidentes nucleares es muy pequeña (1.1 %).

De todas las fuentes de radiación ionizantes a las que están sometidos los seres vivos, la más importante es la de origen natural (Suarez al., 1997). Las fuentes naturales de radiación son la causa de la principal exposición a las radiaciones ionizantes para el público en general (el 87% de la dosis efectiva anual equivalente a 2.4 mSv año) (UNSCEAR; 2000; WHO; 2009).

La radiación de origen natural proviene tanto de fuentes extraterrestres (radiación cósmica) como de los elementos radiactivos presentes en la tierra (radiación terrestre). La radiación cósmica es el conjunto de partículas procedentes del sol y de las estrellas, que atraviesan la atmósfera terrestre y alcanzan el suelo. Aproximadamente contribuye en un 10 % (NRPB; 1981) a la dosis recibida por la población. La radiactividad terrestre se debe a radionúclidos presentes en rocas y suelos, principalmente ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U y ^{40}K , cuyas vidas medias son suficientemente largas ($>10^{10}$ años) para que a día de hoy se encuentran aún presentes en la tierra, así como a los radionúclidos que provienen de su desintegración radiactiva (^{238}U , ^{232}Th y el ^{235}U).

En la naturaleza aparecen tres isótopos diferentes del uranio: el ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U . Este último es el que tiene una mayor relevancia, puesto que encabeza la cadena radiactiva en la que se genera en el proceso intermedio el ^{222}Rn elemento que contribuye en un 47 % a la dosis recibida por la población siendo la principal fuente de radiación natural a la que se someten los seres vivos.

Como se observa en la siguiente figura 2 todos los elementos radiactivos se caracterizan por tener un periodo de semidesintegración o tiempo necesario para que la mitad de sus átomos desaparezcan. En el caso del ^{238}U es de 4.47×10^9 años (4.47 miles de millones de años). En el proceso de transformación, se generan nuevos elementos, entre los cuales se encuentra el ^{226}Ra cuyo periodo de semidesintegración es de 1600 años, y a partir del cual se creará el radón ^{222}Rn que presenta un periodo de semidesintegración de 3.83 días.

Pese a ser la principal fuente de radiación natural, a día de hoy no hay una normativa clara y precisa sobre el radón. Existe una extensa y amplia gama de normativa y recomendaciones nacionales como internacionales relativa a la protección radiológica, pero la regulación del radón en los interiores de las edificaciones se ha centrado en la

protección de los trabajadores, dejando en un segundo plano la normativa que regule la protección de los habitantes de viviendas (ver anexo normativa).

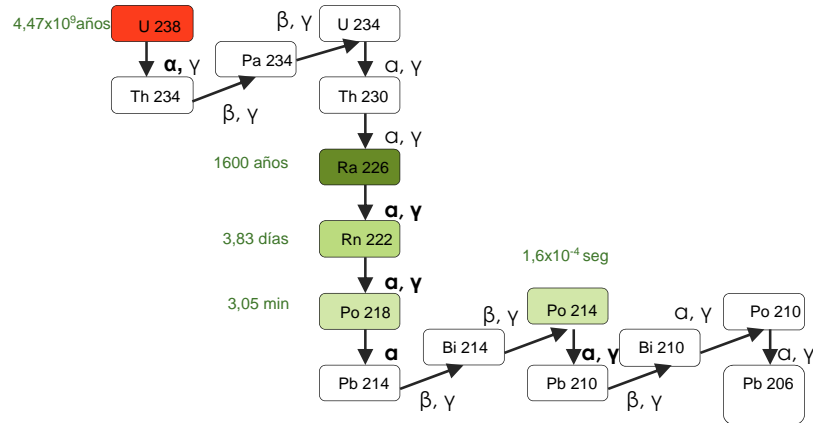


Figura 2: Esquema de la desintegración de la serie del ^{238}U

2

¿QUÉ ES EL RADÓN?

Como se ha explicado anteriormente en nuestro planeta aparecen elementos radiactivos de origen natural presentes en el aire, agua y suelos. El ^{222}Rn es un gas inerte de origen natural, incoloro, inodoro e insípido que en si no entraña peligro procedente de la cadena de desintegración del ^{226}Ra y a su vez forma parte con éste de la cadena de desintegración del ^{238}U .

La peligrosidad del radón se relaciona con su carácter radiactivo que hace que sus descendientes de vida corta (^{218}Po y ^{214}Po), de carácter sólido y emisores alfa se vinculen a las partículas presentes en el aire y sean incorporados por inhalación al organismo fijándose en los distintos tramos del aparato respiratorio, especialmente en la zona pulmonar.

La inhalación continuada de radón y sus descendientes de vida corta constituye la principal fuente de radiación ionizante para la población. En 1988, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), incluyó al radón en la categoría principal de agentes cancerígenos. La clasificación de la IARC se basa en la evaluación de las evidencias científicas disponibles que asocian la exposición a determinados agentes físicos y químicos con el cáncer en seres humanos. El Grupo 1 al que pertenece el gas radón se denomina “Cancerígenos para los seres humanos” e incluye aquellos agentes para los que existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en personas (IARC, 1988). Desde entonces, un gran número de estudios ha confirmado la relación entre la exposición al radón en el ámbito residencial y el incremento del riesgo de sufrir cáncer de pulmón (Darby et al, 2006; Sainz et al, 2009). Según la Organización Mundial de la Salud, en su documento WHO Handbook on indoor radón. 2009, el radón es el responsable de entre el 3% y el 14% de las muertes por cáncer de pulmón en países desarrollados (WHO; 2009; IAEA, 2011)

El radón al aire libre presenta bajas concentraciones, mientras que en el interior de edificaciones y lugares cerrados (pozos, galerías, cuevas...) se puede dar el caso de que aparezcan concentraciones elevadas. Se estima que la dosis equivalente efectiva anual es de $70 \mu\text{Sv/a}$ para los isótopos de vida corta del radón en los exteriores de los edificios y de $1.000 \mu\text{Sv/a}$ en recintos cerrados (Suarez et al., 1997).

De ahí la importancia de localizar zonas en las que exista una mayor probabilidad de encontrar viviendas con altas concentraciones de radón.

2.1 LA PRODUCCIÓN DEL ^{222}Rn

Cierto tipo de rocas (como es el caso de formaciones graníticas y pizarrosas) contienen de forma natural alto contenido en ^{238}U , a partir del cual se genera el ^{226}Ra y posteriormente el ^{222}Rn . Los átomos del ^{238}U y ^{226}Ra son de tipo sólido, por lo cual no existe posibilidad de desplazamiento. Es la desintegración del ^{226}Ra presente en la roca el punto de partida para que una fracción de átomos de radón abandone el medio sólido, pasen a un medio gaseoso y alcancen los poros del terreno. Este es un proceso denominado emanación. Una vez en los poros, el radón, no reaccionará con ningún otro elemento y estará en condiciones de desplazarse a través de dichos poros, hasta alcanzar la superficie del suelo, desintegrarse y dar lugar a sus descendientes (^{214}Po y ^{128}Po) (Quindós Poncela, L.S; 1995).

Aunque el ^{218}Po y ^{214}Po son los responsables de la mayor parte de la dosis que recibe la población, en general se considera que la concentración de gas radón constituye una buena variable de medida de concentración de estos descendientes. Así, las mediciones de gas radón suelen preferirse a las de los productos de desintegración por ser relativamente simples y relativamente baratas (WHO; 2009).

2.1.1 EL PASO DEL RADÓN A LOS POROS DEL TERRENO (EMANACIÓN)

El proceso de generación del radón se inicia con la desintegración del núcleo del ^{226}Ra , produciendo una partícula alfa que es emitida en dirección contraria al átomo del radón. Este retroceso hace que el átomo pueda penetrar hacia el interior del mineral o bien migrar hacia los poros presentes entre los granos (emanación). En definitiva, la emanación es la cantidad de radón que sale de los granos del suelo o roca, y que se incorpora a los poros. Algunos estudios (Nazaroff, W.W and Nero, A.V, 1988; Suarez et al., 1997) sitúan el coeficiente de emanación del radón en el rango 0,2-0,5.

En este proceso de emanación es necesario señalar la importancia que representa el tamaño y distribución de los granos y la distribución del radio en los mismos: Si el

grano es fino se producirá una mayor emanación de radón que en el caso de un grano más grueso.

En cuanto a la distribución del radio, si el radio se encuentra distribuido uniformemente dentro del grano, su poder de emanación será menor que si se encuentra distribuido en forma de película alrededor del grano (Suarez et al., 1997)

2.1.2 EL TRANSPORTE DEL RADÓN

Una vez producido el proceso de emanación, el radón presente empezará a desplazarse mediante dos procesos relacionados entre sí como son la difusión y la convección.

La difusión se produce por gradientes de concentración del radón desde zonas en que su concentración es alta hacia zonas en las que la concentración es menor. Por otro lado, debido a diferencias de presión y temperatura el radón se verá arrastrado por movimientos convectivos (verticales) y advectivos (laterales), a través de los poros y fisuras en las rocas. Este flujo convectivo es más rápido que el de tipo difusivo y constituye la principal contribución a la exhalación de radón a través de la superficie de un suelo o de una roca, cuando en el interior de estos se establecen las apropiadas diferencias de presión que lo originan. Para un determinado gradiente de presiones este flujo convectivo de radón se halla controlado por la permeabilidad del suelo o la roca en que se desarrolla. Por esta razón la exhalación de radón en los suelos arenosos y limosos tiende a ser mayor que en los arcillosos menos permeables.

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese y está condicionado por la interconexión entre los espacios porosos de los suelos y rocas, por lo que es el factor clave a la hora de explicar la movilidad y transporte del radón (Suarez et al., 1997): Si hay agua en los poros no existirá una interconexión entre éstos, por lo que el movimiento del radón se ralentizará, pero si los poros se encuentran interconectados el radón se moverá más fácilmente. Es decir, a menor permeabilidad menor movilidad de radón mientras que a mayor permeabilidad mayor movilidad de radón.

La propagación del radón debido al factor permeabilidad dependerá de las propias características de los suelos y rocas. En general se habla de dos tipos de porosidad. La porosidad intergranular, debida a los espacios entre los granos minerales y/o las

partículas que constituyen la roca, y la porosidad por fisuración, debida a las fracturas, diaclasas y discontinuidades presentes en las formaciones rocosas.

En el caso de calizas y dolomías, la porosidad intergranular es baja, por lo que en un principio presentan baja permeabilidad y, la difusión de radón suele ser baja. No obstante, cuando estas rocas están karstificadas son mucho más permeables. Por otro lado, los suelos residuales que producen son por lo general muy arcillosos e impermeables.

Las arcillas son rocas de muy baja permeabilidad y por lo tanto presentan escasa difusión para el radón a pesar de contengan una concentraciones de uranio apreciables. Además suelen estar saturadas en agua lo que reduce aún más la permeabilidad.

Las rocas graníticas en cambio son muy poco porosas y suelen estar poco fracturadas, pero si se encuentran meteorizadas favorecerán la propagación del radón. Algunas rocas, como las grauvacas y arcosas, que provienen del desmantelamiento de rocas graníticas suelen presentar alta porosidad por lo que son muy permeables.

Las pizarras y cuarcitas suelen estar muy fracturadas lo que les confiere una alta porosidad por fisuración, por lo que estas rocas son favorables a la propagación del radón.

En el caso de otros materiales sedimentarios detríticos, la porosidad suele ser mayor (porosidad intergranular), por lo que también suele ser mayor la permeabilidad. Los materiales más porosos son los conglomerados y las arenas, así los depósitos aluviales y otras formaciones superficiales.

La presencia de fallas activas constituye un camino que puede favorecer de la presencia de radón en suelos, pero no siempre se relaciona con el aumento de nivel de radón en las viviendas. Algunos estudios incluyen este factor junto con el de peligrosidad sísmica (indicativo de fallas activas) para realizar mapas predictivos de gas radón, pero no se ha observado de manera clara una correlación significativa (García et al., 2013a)

2.2

FACTORES QUE FAVORECEN LA APARICIÓN DEL ^{222}Rn EN EL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS

La concentración del radón en las viviendas varía según sea su situación geográfica. La presencia de radón en el interior de las viviendas tiene como principal fuente la

composición del suelo sobre la que se asienta la edificación, y su concentración es muy variable en función a múltiples factores tales como las características de las edificaciones, los hábitos de sus ocupantes, los factores ambientales o el más importante de todos, la geología sobre la que se asienta la edificación.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EDIFICACIONES Y HÁBITOS DE LOS OCUPANTES

Las propias características de la vivienda (tipología edificatoria, antigüedad y materiales de construcción) son en muchas ocasiones las que determinan una mayor o menor concentración de radón en su interior. Aspectos como las vías de entrada (figura 1) que el radón encuentra para introducirse en la edificación (por grietas, sumideros o desagües) viene marcada por estas mismas características de las edificaciones (ICRP; 1993).

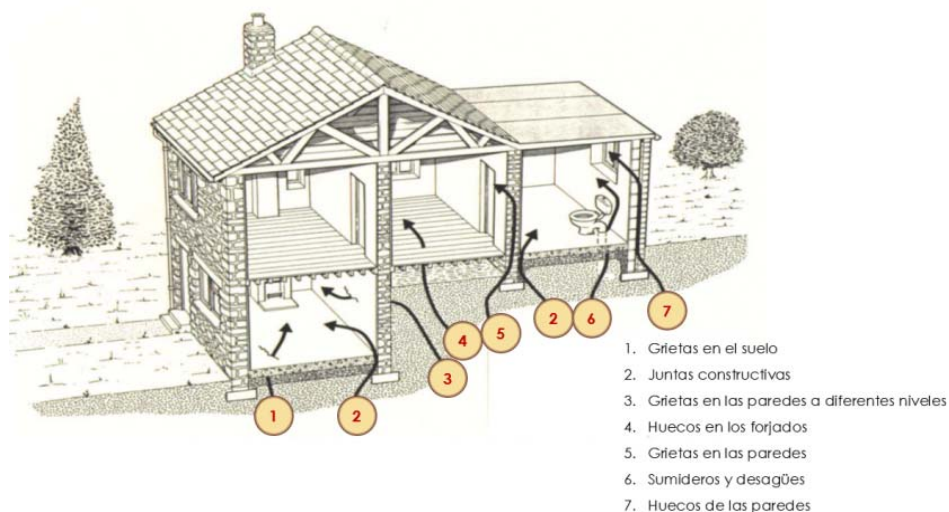


Figura 1: Vías entrada radón en viviendas. Elaboración propia. Fuente (ICRP; 1993)

Es necesario señalar que existe una contribución a la concentración de radón por parte de la exhalación de los materiales constructivos de las viviendas. Este hecho es debido a que hay materiales de construcción que contienen uranio de forma natural debido a su zona de procedencia (Quindós Poncela, L.S; 1995) y debido a la utilización de materiales que emplean como aditivos materiales industriales que presentan un alto contenido de radio (Keller et al, 2001; Quindós Poncela, L.S; 1995.; Martín Matarranz, J.L., 2004). En todo caso, por lo general la contribución de los materiales de

construcción no supera el 20-30% del total de radón presente en una sala ([Quindós Poncela, L.S; 1995](#)).

Aunque las características propias de la vivienda son las que marcarán una mayor o menor concentración de radón en su interior, es importante enfatizar la incidencia de los hábitos de sus ocupantes.

La ventilación natural de la vivienda (o tasa de intercambio del aire entre el interior y el exterior) es uno de los aspectos clave a la hora de analizar y controlar la concentración de radón en los interiores. Si bien en viviendas con bajas concentraciones, al aumentar la ventilación se reduce la presencia de este gas debido a que se produce la dilución del radón presente en la sala, en viviendas con altas concentraciones esta medida puede no ser suficiente, afectando a otros aspectos importantes de la habitabilidad como el confort térmico o la eficiencia energética. En varios estudios ([Quindós Poncela, L.S; 1995](#); [Frutos, B et al., 2014](#)) se explica de forma experimental la evolución de radón en dos viviendas con la misma concentración inicial de 500 Bq/m³ pero con diferentes tasas de ventilación (0.25 h⁻¹ y 1.5 h⁻¹). Estas tasas se corresponden con la tasa de renovación del aire para una vivienda hermética y una vivienda con ventilación habitual. ([C. Dimitroulopoulou, 2012](#))

Al aumentar la ventilación 0.5 h⁻¹ se producen diferentes situaciones: La vivienda más hermética consigue reducir su concentración un 68% (a 160 Bq/m³) mientras que la segunda tan solo reduce la concentración un 24% (a 380 Bq/m³)

En definitiva, la ventilación natural es efectiva en viviendas con concentraciones entre 150-200 Bq/m³, pero en viviendas con valores superiores a los 400 Bq/m³ la ventilación no atenúa la concentración. Además, existe una variación estacional en la concentración de radón a lo largo de los meses de verano e invierno debido en gran medida a la ventilación de la vivienda debido principalmente a que éstas se ventilan menos en invierno que en verano ([Quindós Poncela, L.S; 1995](#))

Por ello, las mediciones deberán realizarse en un periodo de entre 3 y 6 meses abarcando en lo posible el periodo invernal, para así poder establecer una concentración media bajo las condiciones más desfavorables de radón en aire. Además, actualmente, cualquier vivienda, oficina o local tiene que obtener un certificado de eficiencia energética. Este certificado incluye información sobre las características energéticas de un edificio calificándolo a partir del consumo anual de energía necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en condiciones normales de ocupación y funcionamiento, incluyendo la producción de agua caliente,

calefacción, iluminación, refrigeración y ventilación. La problemática aparece en este aspecto, pues al intentar buscar edificaciones lo más estancas posibles para lograr el ahorro energético, se consigue la hermeticidad de una vivienda con lo que a su vez puede provocar que se aumente la concentración de radón en su interior.

2.2.2 FACTORES AMBIENTALES

Del mismo modo que los hábitos de los ocupantes tienen importancia en la presencia de una mayor o menor concentración de radón en las viviendas, los factores ambientales afectan en gran medida a la movilidad del radón en los suelos: la pluviosidad, temperatura, presión atmosférica o la topografía de una zona son parámetros de estudio a la hora de analizar la migración del radón.

La pluviosidad se relaciona de manera directa tal y como se verá en apartados posteriores con la humedad y permeabilidad de suelos y rocas. En periodos de fuertes lluvias el agua satura los poros del terreno, y debido a la facilidad de disolución del radón en el agua, consigue desplazarse grandes distancias. Debido a que el suelo sobre el que se asienta la edificación permanece seco hace genere un camino preferencial al flujo de radón, por lo que generalmente después de los periodos de lluvias la concentración suele aumentar.

Respecto a la temperatura, se sabe que existe una variación de concentración de radón a lo largo del día debido a las diferencias de temperatura entre el interior y exterior de las viviendas. El radón se verá transportado por movimientos convectivos al interior de las mismas debido a las diferencias de presión entre el interior y el exterior, presentando un máximo a primeras horas de la mañana. Al descender la presión atmosférica, se facilita la salida del radón del suelo debido a las diferencias de presión (proceso convectivo). Este efecto se verá favorecido por la presencia de calefacciones. ([Nazaroff, W.W and Nero, A.V, 1988](#))

El factor topográfico se encuentra relacionado con la pluviosidad y la temperatura. Por lo general las viviendas situadas en los fondos de valles presentan un nivel de radón más bajo que las viviendas situadas en las laderas debido a que sus terrenos se encuentran peor drenados y con materiales menos permeables, mientras que en la zona de ladera se producen efectos convectivos derivados de la existencia de gradientes de temperatura ([Quindós Poncela, L.S; 1995](#))

2.2.3 FACTORES GEOLÓGICOS: PRESENCIA DE ^{226}Ra EN LA ROCA O SUELO

El terreno sobre el que se asienta la vivienda es un factor que condiciona en buena medida la posibilidad de encontrar concentraciones elevadas en el área en el que se localiza la misma.

Dentro de los factores geológicos existen diversos parámetros que influyen en la presencia de altas concentraciones de radón ([Schumman et al, 1994](#)). Los principales se explican a continuación:

El principal indicador de la probabilidad de encontrar altas concentraciones de radón en los interiores de las edificaciones es la presencia de radio en los suelos y rocas como fuente de emisión natural de radón. Este aspecto hace que según sea la geología de una región exista mayor o menor concentración de radón en una vivienda por el simple hecho de asentarse sobre formaciones litológicas que presenten una alta proporción de uranio: cuanto más ^{226}Ra más ^{222}Rn se generará.

Por ello es conveniente en este punto analizar y presentar una síntesis de los diferentes tipos de minerales y rocas en relación con su contenido en uranio.

ROCAS Y MINERALES CON ALTO CONTENIDO EN ^{238}U

Para comenzar conviene establecer la diferencia entre mineral y roca. Un mineral se puede definir como un compuesto químico sólido y homogéneo, de origen natural, formado como consecuencia de un proceso generalmente inorgánico, dotado de una composición química definida, aunque variable dentro de ciertos límites, y con una estructura interna ordenada ([Carretero et al., 2007](#)). Por otro lado, se considera una roca como un agregado de uno o varios minerales.

Cada mineral tiene unas propiedades características diferentes de otras especies minerales, y aunque normalmente la mayoría son radiactivamente estables en unas condiciones muy concretas de presión, temperatura y medio químico, también existen otros que no lo son. Esta propiedad se encuentra únicamente en minerales que contienen elementos radiactivos de las series del uranio, torio, potasio o actinio.

En este apartado se analizará únicamente la serie del ^{238}U por ser el elemento que interesa desde el punto vista de generación del ^{222}Rn . El uranio se encuentra en gran proporción en una serie de minerales relativamente frecuentes como la *pechblenda*, *uraninita*, *óxidos negros* (óxidos), *autumnita*, *sabugalita*, *torbernita*, *seunerita* (fosfatos y arsénicos), *uranopilita* (sulfatos), *carnotita*, *tyuyamonita*, *francevillita* (vanadatos), *cofinita*, *uranofano* (silicatos), *brannerita* (tantalatos). Siendo los más frecuentes la *torbernita* y *autumnita* y *tyuyamonita* (Suarez et al., 1997)

Los principales minerales esenciales con uranio (que constituyen >5% del contenido de la roca) y los minerales accesorios (< 5% de la roca) son los que figuran en la siguiente tabla 1 (Suarez et al., 2005)

MINERALES ESENCIALES	Valores medios de Uranio		Rango ppm
	Bq/kg	ppm	
Cuarzo	20.9	1.7	0.1-10
Feldespatos	33.2	2.7	0.1-10
Biotita	99.6	8.1	1-60
Moscovita	145.1	11.8	2-8
Hornblenda	7.9	0.64	0.2-60
Piroxenos	44.2	3.6	0.1-50
Olivino	0.0615	0.05	
Epidota	528.9	43	20-200
MINERALES ACCESORIOS	Valores medios de Uranio		Rango ppm
	Bq/kg	ppm	
Alanita	2460	200	30-1000
Apatito	65	799.5	10-100
Monacita (en granitos, pegmatitas, rocas derivadas y placeres)	36900	3000	500-3000
Esfena		280	10-700
Xenotima(en granitos, pegmatitas, rocas derivadas y placeres)			300-40000
Zircón(en R. Ígneas ácidas y alcalinas, pegmatitas y placeres)		1330	100-6000

Tabla1: Resumen de Minerales esenciales y accesorios con contenido en uranio. Fuente (Suarez et al., 2005)

Otros minerales accesorios son la *keralita* (presente en placeres), *baddeleyita* (en carbonatitas, gabros, basaltos y placeres), *torita* (en greisen procedentes de granitos alterados), *niobita* (en granitos, pegmatitas, filones de cuarzo y greisen), *tantalita* (en granitos, pegmatitas, filones de cuarzo y greisen).

Existe un ciclo de las rocas con procesos magmáticos, sedimentarios o metamórficos a partir del cual los minerales constituyentes se reciclan y transforman en otros. Según su origen en se pueden clasificar en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas

1. ROCAS IGNEAS

Representa más del 90% del volumen de la corteza terrestre. Las rocas ígneas se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios. Por ejemplo según la abundancia relativa de minerales primarios félsicos (ricos en Si, Al, Ca, Na y K) y minerales máficos (ricos en Fe y Mg).

Sin embargo en lo que se refiere al contenido en uranio es más relevante la clasificación a partir de la abundancia en óxido de sílice (SiO₂) (figura 2), distinguiéndose entre rocas ácidas (>65% de SiO₂), rocas intermedias (65-52%), rocas básicas (52-45%) y rocas ultrabásicas (<45%).

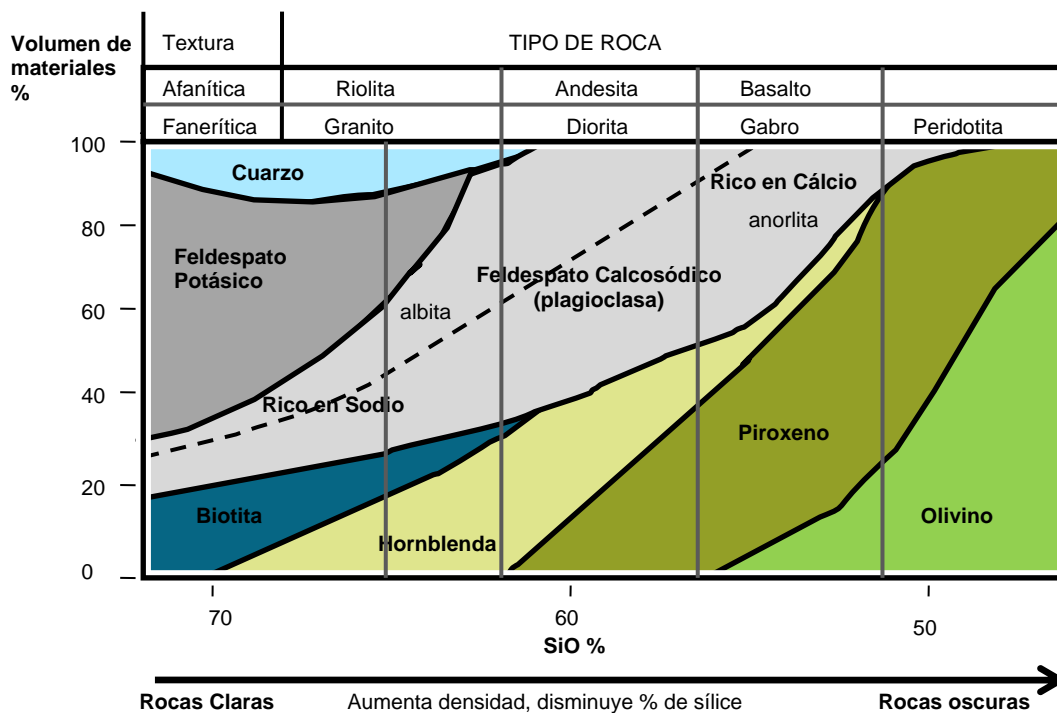


Figura 2: Clasificación de las rocas ígneas. Elaboración propia. Fuente (Tarbuck y Lutgens 2005)

Según diferentes autores (Coppens, R, 1963) hay un aumento de la radiactividad a mayor contenido en sílice, siendo la concentración del orden de 6 ppm de U en el caso de las rocas ácidas. La radiactividad en rocas básicas es del orden de 1-2 ppm de U.

Sin embargo, rocas con el mismo contenido en sílice pueden tener una gran variabilidad.

La composición de estas rocas depende en gran medida de las características químicas del magma, de su enfriamiento y cristalización. De manera simplificada se pueden clasificar las rocas ígneas en las siguientes categorías:

1.1 Rocas Plutónicas (intrusivas): formadas a partir del enfriamiento lento y en profundidad del magma (a grandes presiones). Son rocas poco porosas con textura granulada y presentan grandes cristales (textura fanerítica).

En función de su contenido en sílice las rocas intrusivas se pueden clasificar en:

- Dunitas* (rocas ultrabásicas) ----0.001-1 ppm de U (Suarez et al., 1997)
- Gabros* (rocas básicas, <50% de sílice) ---- 1 ppm de U (Coppens, R, 1963)
- Dioritas* (rocas intermedias, <60% de sílice), *granodioritas* y *sienitas* (50-60% de sílice) ----1.5-2 ppm de U (Coppens, R, 1963)
- Granitos* (rocas ácidas, 65-75% de sílice) ---- 3 a 4 ppm de U (Coppens, R; 1963)

Como se observa, los valores más elevados de uranio se encuentran asociados a las rocas plutónicas intrusivas ácidas fundamentalmente *granitos*.

1.2 Rocas Volcánicas (extrusivas): se generan por el enfriamiento rápido del magma en superficie, a temperatura y presiones bajas. Como consecuencia, la textura es microcristalina (afanítica).

En función de su contenido en sílice se pueden clasificar en:

- Rocas básicas: *lavas básicas*---1 ppm de U, *basalto* ---- 1.6-1.9 ppm de U (Coppens, R; 1963)
- Rocas intermedias: *andesita*---1-1.7 ppm de U, *dacita* ----2-3.6 ppm de U (Coppens, R; 1963)
- Rocas ácidas: *riolitas* ----1.8 ppm de U (Coppens, R; 1963)

Pueden aparecer altas concentraciones de uranio en *riolitas* (también en *tobas volcánicas*)

1.3 Rocas Filonianas: se generan cuando la velocidad de enfriamiento del magma es medio. Su porosidad es casi nula y su textura es muy variable.

Pueden aparecer altas concentraciones de uranio en *pegmatitas (macrocrystalinas)* y *aplitas (microcrystalinas)* (Suarez et al., 1997; Quindós Poncela, L.S; 1995)

Las zonas graníticas del Galicia y del oeste de España junto con el Sistema Central, fundamentalmente constituidas por rocas intrusiva ácidas, presentan elevados valores de uranio (>2.88 ppm) (FOREGS, 2016), localizándose los principales yacimientos en los depósitos asociados al granito del dominio Herciniano (Sierra de Guadarrama, Cáceres en la mina de uraninita masiva de Albalá, Jaén en Andújar), en pegmatitas y aplitas (Sierra de Guadarrama y Sierra de Albarrana) (Menor Salván, C; 2013)

2. ROCAS SEDIMENTARIAS

Son rocas originadas a partir de la litificación de fragmentos (detritos; rocas detríticas) de otras rocas, de precipitados químicos o de acumulación de restos orgánicos.

La concentración de uranio en este tipo de rocas es muy variable debido a numerosos factores: la propia naturaleza de la roca madre, su actividad, su distribución, la naturaleza de sus elementos radiactivos, las distancias y dificultades de transporte, las condiciones físico químicas existentes en la sedimentación (Coppens, R; 1963). En general, salvo algunas excepciones, las rocas sedimentarias son poco radiactivas.

Al dispersarse los elementos radiactivos, las rocas sedimentarias contienen menos uranio que la roca madre, pues los minerales con contenido en uranio son fácilmente alterables. Aun así hay algunas inclusiones como los zircones que son muy resistentes en la meteorización química y mecánica. (Coppens, R; 1963). No obstante, son rocas en principio más porosas, cuyos granos minerales están más expuestos, y por consiguiente pueden difundir más fácilmente el radón.

Las principales rocas sedimentarias son las que se citan a continuación:

2.1 Rocas Detríticas

Formadas a partir de partículas provenientes de la erosión de otras rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, posteriormente transportadas y sedimentadas.

La clasificación más común de estas rocas se basa en el tamaño de los clastos que forman la roca (Pozo Rodríguez et al., 2008):

-Ruditas: Más del 25% de los granos tiene un tamaño $>$ a 2 mm. Ejemplo; *conglomerados y brechas*

-Arenitas: Más del 75% de los granos tiene un tamaño entre 2 y 0.0625 mm. Ejemplo: *areniscas y grauvacas*

-Lutitas y argilitas: Más del 75% de los granos tiene un tamaño $<$ a 0.0625 mm. Ejemplo: *argilitas, limolitas, arcillitas o argilitas*

No obstante, esta clasificación no tiene en cuenta ni la matriz ni el cemento que ocupa los huecos entre los granos y que determinan en gran medida la porosidad de la roca. La capacidad de emanación del radón depende fundamentalmente de la porosidad eficaz, que tiene que ver con el grado de interconexión de los poros de la roca.

Desde el punto de vista del contenido en uranio, es más significativo el origen (composición mineral) de los clastos: Todas las rocas que derivan del desmantelamiento de las rocas plutónicas acidas, como las *grauvacas* y *arcosas* presentan altos contenidos en uranio, y suelen ser muy porosas. A medida que los sedimentos son más maduros (más tiempo de exposición a la meteorización) se reduce drásticamente el contenido en micas, feldespatos, etc. y permanecen los minerales más resistentes a la alteración ambiental, principalmente el cuarzo. El uranio original que contenían estos minerales alterados, puede lavarse o pasara formar parte de arcillas de neoformación (también puede ser absorbido por arcillas), formando depósitos que pueden llegar a tener hasta 30 ppm de U (Coppens, R; 1963)

2.2 Rocas Químicas

Formadas a partir de la precipitación de sustancias disueltas en soluciones acuosas

- a) Rocas Carbonatadas: Formadas principalmente por minerales de calcita (CaCO_3) o dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Según Bastida (Bastida, F, 2005), estas rocas se pueden clasificar a partir de su contenido en CaCO_3 : *calizas* ($>95\%$), *calizas magnesianas* (90-95%), *calizas dolomíticas* (50-90%), *calizas calcáreas* (10-50%), *dolomías* ($< 10\%$).

Aunque las calizas se consideran rocas químicas, principalmente tienen un origen detrítico-biológico, por acumulación de restos esqueléticos de CaCO_3 , mayoritariamente microscópicos, provenientes del plancton y otros microorganismos.

Las rocas carbonatadas suelen contener bajos niveles de uranio. Las que mayores concentraciones presentan son las *calizas*, *dolomías* y *sideritas*, así como los nódulos de *chert* (roca rica en sílice) y *chert de hierro* que aparecen en las rocas carbonatadas.

b) Rocas Evaporíticas: Son rocas salinas formadas por precipitación de sales al evaporarse el agua en el que estaban disueltas.

Las rocas evaporíticas como es el caso de los *depósitos de evaporación* (yeso, anhidrita, halita, sales de potasio o magnesio) tienen bajas concentraciones de uranio por debajo de 1 ppm (Coppens, R; 1963).

2.3 Rocas Orgánicas

En el caso de las rocas sedimentarias los niveles de uranio están en gran medida relacionados con las condiciones de reducción-oxidación del ambiente en el que se formaron.

Las concentraciones más altas se encuentran en las rocas ricas en materia orgánica (6-1000 ppm), asociado a ambientes anóxicos y sedimentos fosfatados (FOREGS, 2016).

Las rocas orgánicas se forman a partir de la acumulación de sustancias de origen orgánico en medios palustres. Ejemplo: *carbones*, *lignitos*, *turba*

En ellas el contenido en uranio es muy variable: Los que tienen mayor contenido en uranio son los *esquistos negros* y *ampelitas*---5-10 ppm (Coppens, R; 1963). En cambio los *carbones* tienen menor contenido, salvo algunos lignitos.

Los principales yacimientos uraníferos en España de tipo sedimentario se encuentra asociados a lignitos, depósitos de arenisca y placeres (Menor Salván, C; 2013).

3. ROCAS METAMÓRFICAS

Son rocas que han sufrido transformaciones en la textura y/o mineralogía a partir de rocas preexistentes, como consecuencia de alteraciones en los estados de presión y temperatura.

Las rocas metamórficas más comunes son: *pizarras* (producto del metamorfismo regional de grado bajo, a partir de rocas sedimentarias limo-arcillosas), *cuarcitas*(producto del metamorfismo de rocas sedimentarias detríticas muy ricas en

cuarzo), *mármol* (que derivan a partir de rocas sedimentarias carbonatadas, como calizas), *esquistos* y *micacitas* (rocas producto de un metamorfismo de grado medio a partir de rocas detríticas de grano fino), *gneis* (resultan del metamorfismo regional de grado alto; compuestas de cuarzo, feldespato y mica).

Las rocas metamórficas formadas a altas presiones a partir de rocas ígneas o sedimentarias, tienden a mantener el contenido de uranio de las rocas originarias.

Las mayores concentraciones de uranio aparecen en *pizarras*, *gneises*, *esquistos*, *skarns* (producto de metamorfismo de contacto en una roca carbonatada por intrusión de una roca ígnea), *filitas*, *granulitas* (metamorfismo de alta temperatura), *micaesquistos* y *cuarcitas*, teniendo también concentraciones bastante altas las rocas derivadas del metamorfismo de bajo grado de rocas detríticas como las *metagrauvacas*, y *metaconglomerados*.

Algunas rocas ultrabásicas como las *serpentinitas* y *eclogitas* presentan concentraciones entre 0.1-1- ppm de uranio (Suarez et al.,1997)

Los principales yacimientos en España de este tipo son las pizarras y esquistos uraníferos de Salamanca y Badajoz, junto con los depósitos epigenéticos de Salamanca (Saelices, Villar de la Yegua...), Cáceres (Albalá), Badajoz (Don Benito) o de tipo skarn de Burguillos del Cerro(Menor Salván, C; 2013)

2.3

REGIONES GEOLÓGICAS DE ESPAÑA Y SU RELACIÓN CON EL ^{222}Rn

Una vez analizados los minerales y rocas con mayores concentraciones de uranio, se puede clasificar España de manera simplificada en cuatro grandes regiones desde el punto de vista geológico (figura 3):

2.3.1 MACIZO IBÉRICO

Predominan las rocas silíceas. Está constituido por rocas paleozoicas con formaciones sedimentarias, metamórficas y graníticas que aparecen fundamentalmente en el occidente de la península ibérica.

Las mayores concentraciones de radón aparecen en las rocas graníticas y metamórficas (*gneises*, *rocas metamórficas derivadas de sedimentos calizos*, *arcillas negras*, *rocas fosfatadas* y *rocas sedimentarias derivadas de otras con alto contenido*

en *uranio*), aunque también presentan concentraciones medidas y altas algunas rocas *calizas* y *calizas con fosfatos* (Suarez et al., 1997).

Son de destacar las altas concentraciones que aparecen en las formaciones graníticas del Sistema Central (Cáceres, Salamanca, Madrid, Segovia, Toledo y Ávila), al Macizo Galaico-Portugués, y a la zona oeste de Salamanca y Zamora. También aparecen concentraciones elevadas en *afloramientos graníticos* de zonas de Gerona, Badajoz, Córdoba y Sevilla (García et al., 2013a; Quindós et al., 1992).

Las formaciones metamórficas afloran principalmente al oeste de península ibérica y en menor medida en el Sistema Ibérico y en el centro de la Cadena Pirenaica y Cordilleras Costeras Catalanas. También son de señalar los metasedimentos paleozoicos de la *cuarcita armoricana* en Ciudad Real (García et al., 2013a). En este contexto aparecen también los principales afloramientos de carbón y otras rocas orgánicas.

En estas zonas se ha comprobado que existe una marcada correspondencia entre la presencia de elevadas concentraciones de radón y altas tasas de exposición gamma (>14 µR/h) (Quindós et al., 1992; Suarez et al., 1997). Como se verá en apartados posteriores, en el proyecto MARNA se ha evaluado para toda España la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de origen natural, referida a 1 metro sobre el nivel del suelo (García et al., 2013a). Esta tasa puede correlacionarse con el contenido de ²²⁶Ra en el suelo y éste, a su vez, con la concentración de radón en las viviendas.

2.3.2 DOMINIO DE LAS CADENAS ALPINAS

Predominan las rocas calcáreas. Son rocas sedimentarias de origen marino (*calizas*, *margas*, *arcillas*, *lutitas* y *areniscas*), con predominio de rocas carbonatadas. Los materiales calcáreos y dolomíticos, son los que presentan las concentraciones de radón y exposiciones gamma más bajas (<4 µR/h) (Suarez et al., 1997).

Se encuentran localizadas en el área pirenaica y su continuación hacia el occidente (Cordillera Cantábrica), el sur del Valle del Ebro (Sistema Ibérico), la costa mediterránea y el área al sur del Guadalquivir (Cordilleras Béticas). Se corresponden principalmente con materiales del Jurásico y Cretácico (García et al., 2013a). Son también de destacar las altas concentraciones que aparecen en las formaciones triásicas en facies Buntsandstein, *areniscas rojas* (García et al., 2013a).

Las formaciones detríticas de facies albiense aunque poseen escaso contenido en uranio en la roca no alterada, pueden presentar altos niveles de radón si la roca está muy meteorizada, dando lugar a niveles arcillosos ricos en elementos radiactivos (García et al., 2013a).

2.3.3 CUENCAS CONTINENTALES

Son depresiones sedimentarias con predominio de rocas detríticas. Son formaciones sedimentarias cenozoicas de origen continental (*arcillas, margas, areniscas, conglomerados, yesos y rocas calcáreas*) que por lo general ofrecen exposiciones gamma bajas (<4 μ R/h) y se encuentran presentes en las cuencas del Duero, Tajo, Ebro y Guadalquivir (Suarez et al., 1997; Quindós et al., 1992). Aunque existen algunas formaciones que presentan mayores concentraciones, por estar constituidas a partir del desmantelamiento de rocas graníticas o metasedimentarias (García et al., 2013a).

Ejemplos de altas concentraciones son las *calizas lacustres* con alto contenido en arcillas, los *vanadatos* generados a partir de pequeñas concentraciones locales de uranio, los materiales detríticos (*arcosas*) en algunas zonas del Valle del Tiétar o en la Cuenca terciaria de Ciudad Rodrigo debido a que proceden de formaciones graníticas (García et al., 2013a).

2.3.4 ROCAS DE ORIGEN VOLCÁNICO

Son rocas ígneas efusivas (coladas de lavas y piroclásticas), fundamentalmente basálticas por lo que en general presentan bajas concentraciones. Sin embargo, en los casos en los que las rocas son más ácidas (mayor contenido en SiO₂), como *fonolitas, traquitas y riolitas* presentan altas tasas potenciales de radón (García et al., 2013a).

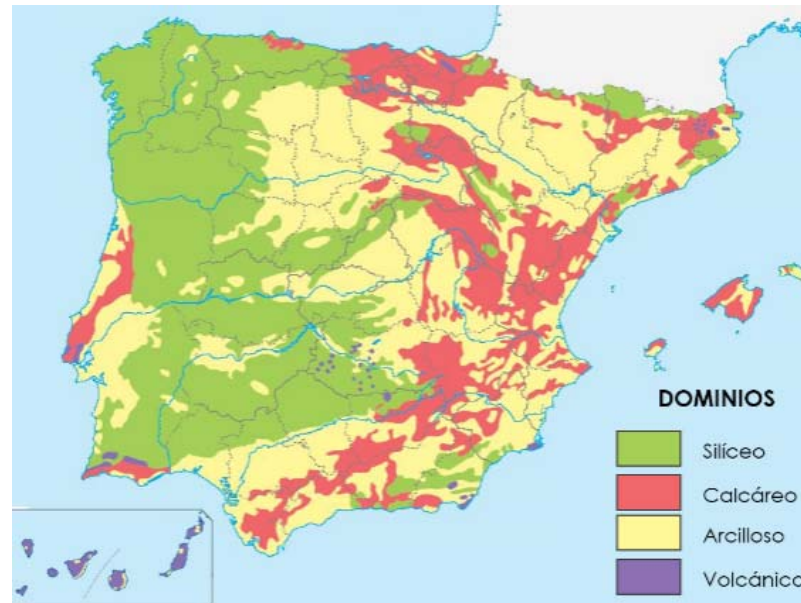


Figura 3: Dominios geológicos. Elaboración propia. Fuente ([Litología, 2016](#))

Los cuatro tipos de dominios anteriormente expuestos poseen diferentes concentraciones de ^{238}U , por lo que a su vez también influye en una mayor o menor presencia de ^{226}Ra en los suelos y rocas. Evidentemente, cuanto más cantidad de ^{238}U contenga un suelo, más cantidad de ^{226}Ra y ^{222}Rn se generará.

Como se ha explicado en el presente apartado, la concentración de radón en las viviendas varía según su distribución geográfica debido a la coexistencia de diferentes factores.

Para identificar las áreas geográficas en las que exista una mayor probabilidad de encontrar altas concentraciones de radón, numerosos países han generado mapas que permitan identificar estas zonas potenciales.

En el siguiente apartado se hace referencia a los mapas del radón realizados en diferentes países y cuál es el estado actual de este tipo de estudios en España.

3

LOS MAPAS DEL RADÓN

A lo largo de la década de los 80 la problemática del radón en el interior de las viviendas como elemento cancerígeno se fue haciendo visible al público en general. Por este motivo muchos países comenzaron a legislar y a realizar mapas de exposición al radón residencial.

En el presente apartado se hace referencia a los países que más evolucionados tienen sus mapas de radón (Estados Unidos y Reino Unido) junto con el estado general de Europa y el estado en el que se encuentra en la actualidad el Mapa Español del Radón.

3.1

MAPAS EUROPEOS Y AMERICANOS DEL RADÓN

La mayor parte de los países analizan la exposición al gas radón por unidades administrativas para facilitar las estrategias de protección y planificación a nivel estatal, autonómico o local. Pero también hay una serie de iniciativas como se verá posteriormente que promueven la representación gráfica de la concentración de radón mediante celdas o cuadrículas con un tamaño definido.

3.3.1 MAPAS AMERICANOS: EE.UU

La United States Environmental Protection Agency (USEPA) desde los años 80 ha promovido la realización de medidas de radón en los Estados Unidos. Los datos de medidas realizadas en viviendas fueron comparados con formaciones geológicas para obtener un mapa (figura 1) en el que se establecían tres zonas para determinar el grado de reducción de radón que había que realizar a las edificaciones de nueva construcción. La zona 1 presenta se corresponde con la probabilidad de encontrar niveles medios de radón superiores a 4 pCi / L (148 Bq/m³), la zona 2 de 2 a 4 pCi / L (148-74 Bq/m³), y la zona 3 para niveles inferiores de 2 pCi / L (<74 Bq/m³)

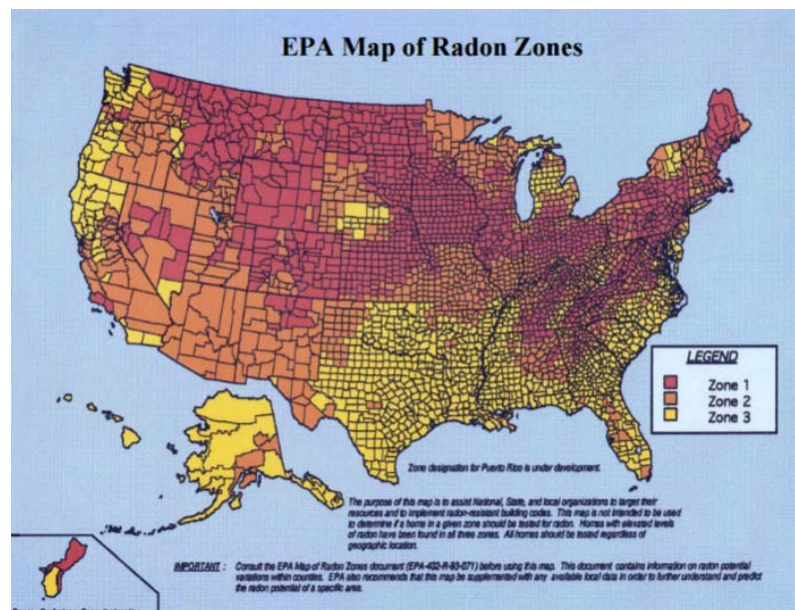


Figura 1: Mapa del Radón Estados Unidos. Fuente (EPA, 2017)

En su página web (EPA, 2017) se puede acceder a un mapa interactivo que ofrece por condados información de la zona en la que se encuentra una vivienda. Además proporciona recomendaciones para construir o vender viviendas, así como información para el público en general.

3.3.2 MAPAS EUROPEOS

La Unión Europea a través de la [Directiva 2013/59/EURATOM](#) establece unos niveles de referencia de promedio anual de concentración de radón en viviendas del orden de 300 Bq/m^3 , indica la necesidad de establecer Planes de Acción Nacionales, y señala que los diferentes países miembros tienen como fecha límite para trasponer esta directiva a sus disposiciones hasta el 6 de febrero de 2018. Como se verá a continuación, algunos países tienen muy avanzada la identificación de zonas de riesgo al radón, pero otros muchos no tanto.

Un caso excepcional es el de Inglaterra, donde la problemática del radón se lleva investigando desde hace décadas, y la implicación gubernamental en términos de reconocimiento y apoyo económico ha sido significativa. En la página web de la Public

Health England (PHE, 2017) se puede consultar el procedimiento de trabajo en la realización de los mapas y ofrece de forma interactiva y en formato pdf los resultados obtenidos. Se realizaron 460000 medidas de concentración de radón en viviendas y se representaron los resultados mediante un sistema de celdas de 1x1km².

El resultado son una serie de mapas que ofrecen del porcentaje de casas que se encuentran por encima del nivel de acción que en el caso de este país se fija en 200 Bq/m³. (Figura 2)

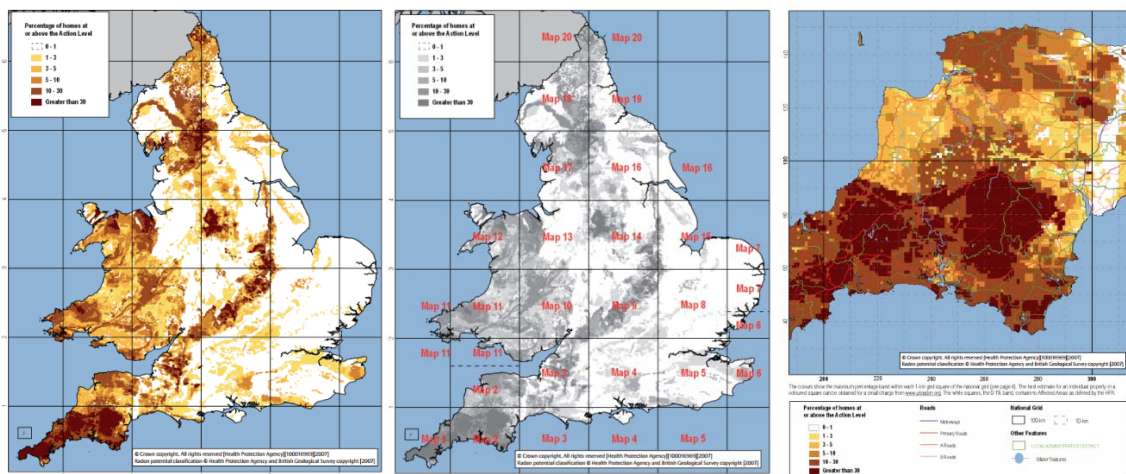


Figura 2: Mapas del Radón Inglaterra. Fuente (PHE, 2017)

25 países de la Unión Europea más 9 extracomunitarios están realizando a día de hoy mapas para identificar la dimensión de la problemática del radón. Se calcula que deberían ser analizadas del orden de 2 millones de viviendas. El problema es que pese a los esfuerzos por unificar criterios en todos los países, se han utilizado diferentes sistemas de obtención de datos, diferentes criterios de muestreo, y a la hora de cartografiar las zonas propensas al radón se han utilizado diferentes niveles de acción.

Aunque la mayoría de los países han utilizado detectores de trazas colocados en viviendas de planta baja o primera planta que se dejaban en las casas durante un periodo de entre 3 meses a un año, y han seguido las recomendaciones europeas de que no se deben de exceder los 400 Bq/m³ en viviendas construidas y 200 Bq/m³ en viviendas de nueva construcción, se observa que la representación de los datos resultó muy heterogénea, mezclando valores de concentración en viviendas con mapas potenciales de radón como es el caso de España.(Figura 3)

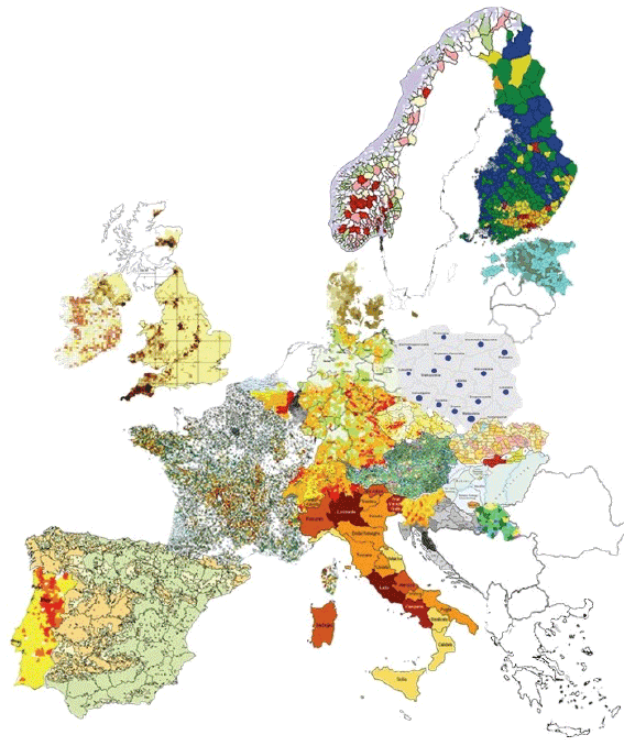


Figura 3: Mapa Europeo del Radón. Fuente [\(Dubois, G., 2005\)](#)

En un intento de armonizar los mapas de los diferentes países, evitar el efecto frontera y crear un mapa a nivel continental, la Joint Research Centre (Comisión Europea) sugirió trabajar en un único sistema de referencia con la proyección GISCO-LAEA (Geographic Information System of the Commission- Lambert Acimutal Equal Area) con un sistema de celdas de 10x10km² con coordenadas de los extremos conocidas. [\(Dubois et al, 2010; Tollefsen et al., 2014; JRC-EC, 2010\)](#).

El resultado es el que se observa en la figura 4 donde se ofrecen los resultados a fecha del 2014 de las medidas realizadas en Europa para la consecución del Mapa Europeo del Radón.

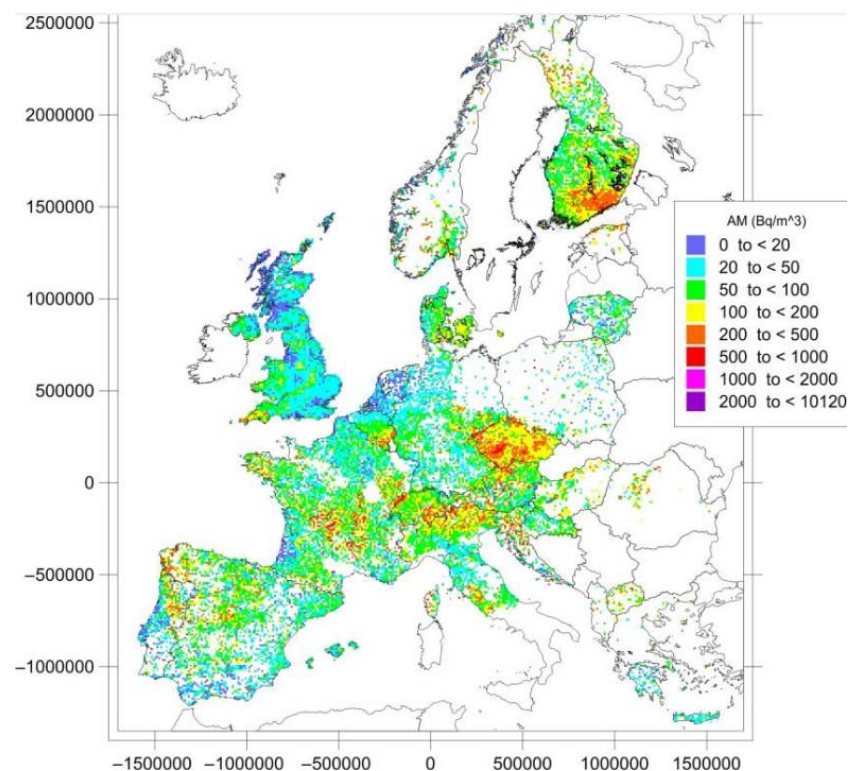


Figura 4: Estado medidas concentración ^{222}Rn en interior de viviendas en 2014. Fuente (Tollefsen et al., 2014)

3.2 EL MAPA ESPAÑOL DEL RADÓN

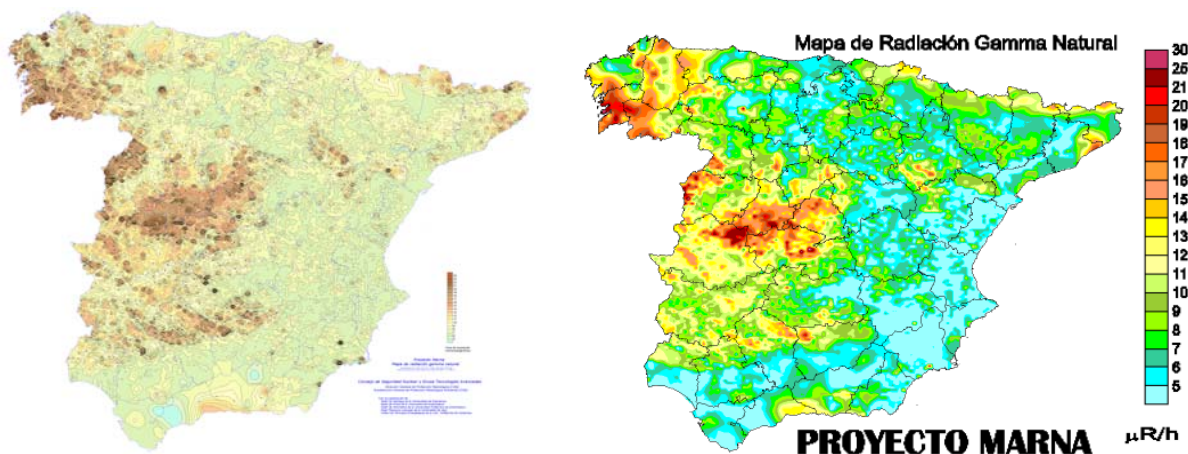
En el caso de España, hasta los años 80 no existía ningún mapa que estimase la exposición a fuentes radiactivas de origen natural, y mucho menos del ^{222}Rn . Es en 1986 cuando ante la necesidad de adaptarse a la [Directiva UE 96/29/Euratom-Título VII](#) en el marco de protección de las personas ante la exposición a las fuentes naturales de radiación, la OIEA y la Unión Europea promovieron la elaboración de Atlas dosimétricos nacionales para estimar la exposición a las fuentes radiactivas de origen natural.

En este sentido en 1991 se empezó a elaborar en España el Proyecto MARNA, que evalúa la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de origen natural a 1 metro sobre el suelo. A la par se empezó a trabajar en la creación de un Mapa

Español del Radón, cuyo principal objetivo es identificar regiones con altas concentraciones de radón en los interiores de viviendas. La creación de este mapa forma parte de un proyecto a nivel europeo como es el Mapa Europeo de Radón, que a su vez será incluido dentro del Atlas Europeo de Radiación Natural (Dubois et al., 2010; Tollefsen et al, 2011; Boseew et al, 2015 ; de Cort et al, 2011)

3.2.1 ANTECEDENTES: EL PROYECTO MARNA

Se elaboró en cuatro fases entre los años 1991-2005 cubriendo diferentes zonas de España mediante la realización de medidas aéreas y terrestres con diferentes técnicas de análisis que posteriormente fueron correlacionadas. Los datos de tasa de exposición se encontraban en un rango entre los 3 y 30 $\mu\text{R}/\text{h}$ ($1 \mu\text{R}/\text{h} = 0.01\mu\text{Sv}/\text{h}$). El mapa de exposición a la radiación gamma a nivel nacional se realizó para una escala 1:1.000.000, utilizándose un modelo de interpolación Kriging con un tamaño de pixel de salida de 7x5km especificándose una asiontropa (orientación) siguiendo la dirección de las principales estructuras geológicas (Suarez et al., 1997). El resultado son las imágenes que se muestran a continuación (figuras 5 y 6)



Figuras 5 y 6: Mapas de Radiación Gamma Natural (derecha) y potencial de ^{222}Rn (izquierda) (Suarez et al., 1997).

Este mapa de radiación gamma natural servirá para elaborar un mapa de exposición potencial al radón, basándose principalmente en la estimación de la concentración de ^{226}Ra en suelos, y en la estimación de la exhalación del ^{222}Rn a partir de unos parámetros que recogían las condiciones más favorables para la misma.

La estimación de la concentración de ²²⁶Ra en suelos: se definió basándose en que la tasa de exposición total era el resultado del sumatorio de las tasas de exposición del ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K (Suarez et al., 1997).

$$T_{total} = TRa + TTh + TK$$

Donde:

T_{total} = Tasa de exposición total (μR/h)

TRa = Tasa de exposición del ²²⁶Ra (μR/h)

TTh = Tasa de exposición del ²³²Th (μR/h)

TK = Tasa de exposición del ⁴⁰K (μR/h)

A partir de numerosos análisis de suelos y rocas, se elaboraron varias ecuaciones que definían la contribución de cada elemento a la tasa de exposición total (Suarez et al., 1997):

$$T_{total} = 1,505 (\% \text{ de } ^{40}\text{K}) + 0,653 (\text{ppm U natural}) + 0,287 (\text{ppm } ^{232}\text{Th})$$

$$T_{total} = 0.0048 * CK + 0.051 * CRa + 0.076 * CTh$$

Donde

T_{total} = Tasa de exposición gamma total (μR/h)

CK = Concentración de ⁴⁰K (Bq/kg)

CRa = Concentración de ²²⁶Ra (Bq/kg)

CTh = Concentración de ²³²Th (Bq/kg)

Y se indicaron las equivalencias entre la concentración y actividad del K, U, y Th.

Elemento	Tasa	Tasa dosis absorbida				Actividad	
	μRh	μradh	PGy/s	nGy/h	μGy/h	Bq/kg	pCi/g
1% potasio	1.505	1.3	3.633	13.07	0.01310	310	8.37
1ppm eq Uranio	0.653	0.54	1.576	5.67	0.00543	12.3	0.332
1ppm eq Torio	0.287	0.26	0.693	2.49	0.00269	4.0	0.108

Tabla 1: Equivalencias entre concentración y actividad. Fuente (Suarez et al., 1997).

Respecto a la estimación de la exhalación (emanación) del ²²²Rn, se definió la siguiente fórmula (Suarez et al., 1997):

$$R = C_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho [Dc / (\lambda_{Rn} \epsilon)]^{0.5}$$

Donde:

R = Tasa de exhalación de radón ($\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

C_{Ra} = Concentración de actividad de ^{226}Ra en un suelo o roca (Bq/kg).

λ_{Rn} = Constante de desintegración del ^{222}Rn ($2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

f = Coeficiente de emanación del material.

ρ = Densidad del material, suelo, roca, etc.

D_c = Coeficiente de difusión efectiva del material (m^2/s).

ϵ = Porosidad del material.

Se facilitó una tabla con los factores que influyen en la emisión de radón al aire (tabla 2)

Factor	Concepto	Rango normal de la variación	Consecuencia al aumentar el valor
Concentración de actividad del Uranio y ^{226}Ra (Bq/kg , pCi/g)	Número de desintegraciones por ud.de masa (1ppm de U en equilibrio---	1-3000	Aumento del ^{222}Rn
Fracción de emanación (f)	Fracción de ^{222}Rn emitida desde los granos de la roca o suelo a los poros	0.2-0.4	Aumento del ^{222}Rn
Coeficiente de difusión (D_c)	Trasmisividad del ^{222}Rn para atravesar la capa del suelo	$0.2 \text{ a } 2 \times 10^{-4}$	Aumento del ^{222}Rn
Porosidad (ϵ)	$P=1-\epsilon/\bar{\alpha} \cdot \bar{n}$ (agua)	0.25 a 0.45	Aumento del ^{222}Rn
Humedad (ϵ) vol agua (cm^3/vol total (cm^2))	Fracción de saturación=Vol agua/vol poros	6 a 35	Disminución del ^{222}Rn
Densidad seca (\bar{n})	g/cm^3	1.5 a 1.8	Disminución del ^{222}Rn
Peso específico ($\bar{\alpha}$)	ρ (roca o suelo $\bar{\alpha}$ \bar{n} (agua))	2.5 a 2.8	Disminución del ^{222}Rn

Tabla 2. Factores que influyen en la emisión de radón al aire (Suarez et al., 1997).

Se daban todas las pautas de elaboración del mapa de exposición potencial de radón que aparecen en la figura 7.

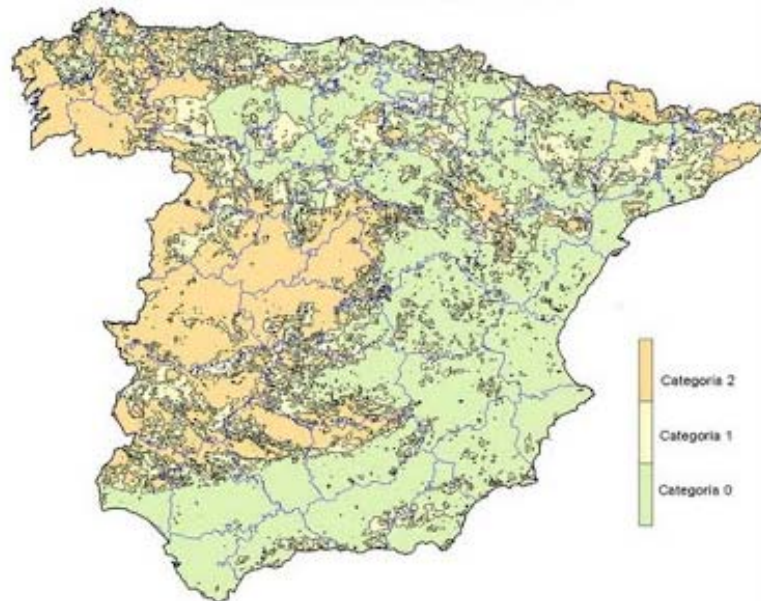


Figura 7: Categorías de exposición potencial al radón (García et al., 2013a)

Este proyecto MARNA presentaba los datos de exposición gamma total a nivel nacional mediante un mapa y ofrecía las equivalencias para correlacionar la concentración y actividad del ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , pero no ofrecía correspondencias para poder correlacionar estos valores de tasas de radiación gamma natural con las concentraciones de radón en viviendas. En este sentido, el MARNA es útil como método de apoyo a la hora de elaborar un mapa predictivo de exposición al radón cuando el número de medidas de radón en viviendas no sea lo suficientemente denso, puesto que correlaciona las tasas de radiación gamma externa con el contenido de ^{226}Ra en suelo y con la probabilidad de encontrar concentraciones de ^{222}Rn en las edificaciones acordes con la radiación gamma media.

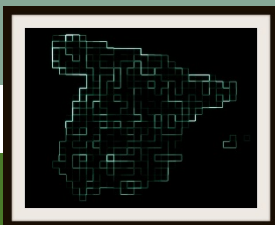
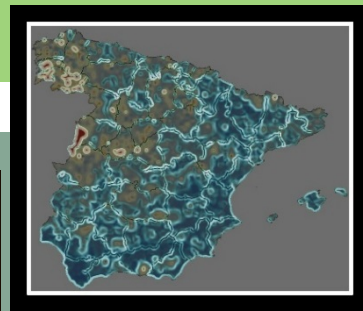
En el caso de España tal y como se ha explicado con anterioridad se utilizó este mapa de radiación gamma natural para elaborar un mapa predictivo de exposición al radón. A pesar de que se ha contrastado su validez comparando los resultados con las medidas disponibles de concentraciones de radón residencial, es un mapa en el que no recoge las medidas in situ. Por ello que se decidió realizar un mapa basado en las mediciones directas de radón en las viviendas.

De este modo y siguiendo los parámetros fijados por Europa para la realización del Atlas Europeo de Radiación Natural (Dubois et al., 2010; Tollefsen et al, 2011; Boseew et al, 2015 ;.de Cort et al, 2011) en el cual se incluye la creación del Mapa Europeo de

Radón, se empezó a realizar el Mapa Español del Radón para identificar altas concentraciones de radón en los interiores de viviendas.

En el apartado metodología se explican en detalle los pasos dados en la realización de este mapa.

METODOLOGÍA



1

OBTENCIÓN Y GESTIÓN DE LOS DATOS

1.1

INTRODUCCIÓN

En la elaboración de este proyecto se han utilizado varios Sistemas de Información Geográfica (GIS) (ArcGIS y GvSIG) que han permitido capturar, almacenar, crear búsquedas, analizar y visualizar los datos obtenidos.

En el proceso de trabajo el GIS permite capturar y analizar la información en formato ráster y en formato vectorial: el formato ráster sería como una imagen digital en donde las entidades se almacenan en píxeles, los cuales contienen información de esa entidad, mientras que en el formato vectorial las entidades se almacenan fundamentalmente mediante puntos, líneas o polígonos (figura 1)

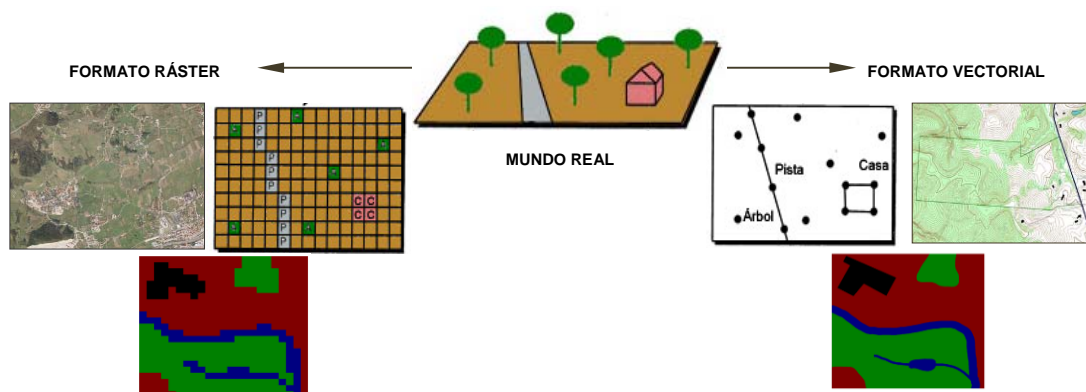


Figura1: Formatos de representación en un sistema de información geográfica

También, para facilitar la representación e interpretación de los datos, se han utilizado programas estadísticos (KaleidaGraph) y hojas de cálculo (Excel).

Como se ha explicado en anteriores apartados, los factores que facilitan la aparición del radón en los interiores de las viviendas son de diferente tipo. Las características de las edificaciones y los hábitos de los ocupantes son factores de importancia a la hora de evaluar la concentración de radón en interiores, pero son variables difícilmente

representables a la hora de realizar un mapa. Es por ello que en este estudio no se han incluido en el análisis final.

El resto de los factores más fácilmente representables espacialmente se han analizado a partir de diferentes elementos. De este modo, diferentes factores geológicos como la presencia de ^{226}Ra en suelos, la permeabilidad de los terrenos, o la emanación y difusión del radón, se han incluido en el análisis a partir de una serie de variables de estudio que se muestran a continuación.

Las variables analizadas han sido:

1. Concentración de ^{222}Rn en aire
2. Tasa total de exposición a la radiación gamma natural
3. Concentración estimada de ^{226}Ra en suelos
5. Presencia de yacimientos de uranio
6. Presencia de fallas
7. Presencia de materiales arcillosos
8. Presencia de materiales cuaternarios
9. Presencia de formaciones kársticas
10. Litoestratigrafías 1:200,000: Según su permeabilidad, origen y tipología
11. Unidades Geológicas 1:1,000,000: Según sus litologías, edades y unidades superficiales

Cada una de estas variables se ha analizado con metodologías diferentes tal y como se explica en este capítulo, pero principalmente para cada variable se ha llevado a cabo un Análisis Descriptivo de los Datos, un Análisis de Datos Espaciales mediante la interpolación espacial o utilizando lógica booleana, y un Análisis de Regresión de tipo simple: correlación lineal de Pearson y coeficiente de determinación R^2 .

Las variables se han representado espacialmente mediante mapas de interpolación y mapas de probabilidad de presencia de cada una ellas.

1.2

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Las variables cuantitativas se han analizado a partir de las medidas de tendencia central como media aritmética y geométrica, mediana y moda, para así reflejar el dato más representativo de la muestra.

También se han calculado las medidas de dispersión, para indicar la concentración de datos respecto a las medidas de centralidad, o lo que es lo mismo, la homogeneidad de los datos. Para ello, se han utilizado los estadísticos más comunes, como la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación.

La desviación estándar señala cuánto tienden a alejarse los valores de la media, la varianza da una idea de la dispersión de la distribución y el coeficiente de variación señala la representatividad de la media. Respecto al coeficiente de variación, si es menor de 100 no existirá un problema con los datos extremos, si el coeficiente oscila entre 100 y 200 los valores extremos de los datos son tolerables, mientras que si se supera el valor 200 existen problemas con estos extremos de los datos (Agua y SIG, 2016).

Además, estas variables serán representadas a partir de medidas de la forma de la muestra para observar el grado de deformación respecto a la distribución normal mediante los coeficientes de curtosis y asimetría. El coeficiente de curtosis señala el grado de aplastamiento mientras que el coeficiente de asimetría indica el grado de inclinación de la distribución (figura 2)

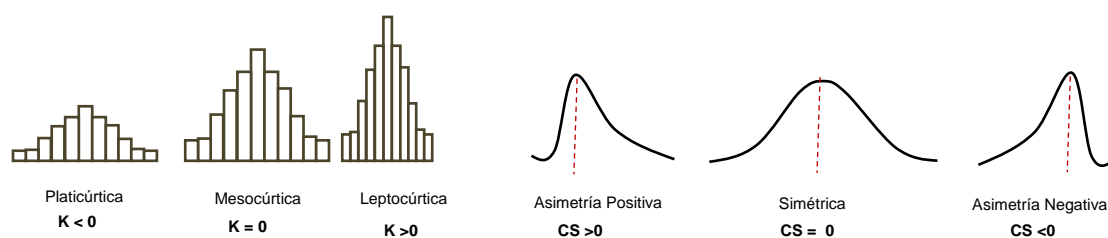


Figura 2: Tipo de distribución de la muestra

Para representar gráficamente el grado de desviación de la distribución de resultados con respecto a la distribución normal se utilizarán histogramas y gráficos Cuantil-Cuantil (Q-Q Plot). Este último proporciona un diagnóstico sobre la desviación entre la distribución real de los datos disponibles, y una determinada distribución de probabilidad teórica.

Las variables cualitativas serán descritas a partir de los puntos obtenidos de concentración de ^{222}Rn .

1.3**ANÁLISIS / TRATAMIENTO DE LOS DATOS ESPACIALES****1.3.1 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN**

La interpolación espacial utiliza puntos con valores conocidos para crear una superficie ráster con estimaciones para todas las celdas, basándose en métodos determinísticos y en métodos geoestadísticos. Con el fin de mantener la mayor información posible en los mapas de radón basados en medidas experimentales, se ha utilizado la interpolación para asignar valores numéricos a celdas que no contienen ningún valor experimental. A continuación de manera resumida se explican sus fundamentos:

MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en fórmulas matemáticas que determinan la suavidad de la superficie resultante (ESRI, 2016). Uno de los métodos empleados es el IDW (ponderación inversa a la distancia).

Este método IDW es un método de interpolación basado en las distancias, partiendo del supuesto de que los valores que están más cerca son más parecidos y por lo tanto tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Moreno, A; 2008)

Esta interpolación determina los valores de las celdas a través de una combinación ponderada linealmente a partir de un conjunto de puntos de muestra (ESRI, 2016), es decir, pondera los puntos de manera similar basándose en la distancia que aparece desde el punto de interpolación. Equivale a trazar una línea recta entre dos valores conocidos, por cual todos los valores contenidos en esa línea serán valores pronosticables. Así pues, este método tendrá más fiabilidad cuantas más líneas se tracen alrededor de estos valores conocidos (Moreno, A; 2008)

Además, este método tiende a crear puntos de concentración y formar islas en torno a los puntos de muestra debido principalmente a que se conservan los valores originales de estos puntos por lo que no se pierde la información de origen. Finalmente, es

relevante destacar que por medio de este método se pueden representar datos que no se distribuyen normalmente.

MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS

Los métodos geoestadísticos se basan en modelos que incluyen la relación estadística entre los puntos medidos (autocorrelación), es decir, que presupone que los puntos de una muestra no son independientes, sino que presentan una correlación espacial. Para determinar esta correlación se emplean semivariogramas, permitiendo representar la variabilidad y dependencia de los puntos según su dirección y distancia (ESRI, 2016). Por ello esta técnica tiene la capacidad de producir una superficie de predicción (campo geográfico) y proporcionan alguna medida de precisión de las predicciones (ESRI, 2016).

El método más utilizado es el denominado “Kriging”, que ajusta el modelo de manera lineal, asumiendo una media constante y unas variables estacionarias sin tendencias. De esta manera, y a partir de una cantidad de puntos marcados dentro de un radio específico asignará el valor de la celda de salida.

Es un método que mejora las estimaciones cuando se posee una distribución irregular de los puntos y éstos tienen una correlación débil, pues elimina los valores más altos y más bajos para obtener un menor error en la estimación, por lo que se produce un suavizado generalizado (Peña, J, 2006). Al contrario que otros métodos de interpolación espacial, el Kriging ordinario no es válido para representar datos cuya distribución no sea normal.

En todo caso, la elección del método de interpolación condicionará los resultados y valoraciones finales, por ello en los siguientes apartados se determinará el método de interpolación más adecuado para crear los mapas de interpolación que representan superficies espacialmente continuas de variables, tales como la concentración de ^{222}Rn en aire, la tasa total de exposición a la radiación gamma natural o la concentración estimada del ^{226}Ra en suelos.

1.3.2 LA LÓGICA BOOLEANA

Independientemente de las variables utilizadas, la mayor dificultad para su integración mediante modelos numéricos reside en que parte de la información a integrar es de naturaleza cualitativa y no cuantitativa. Tradicionalmente este problema se ha tratado de resolver generando una serie de mapas de variables que representen la presencia o ausencia de las distintas unidades (booleanas) en las celdas (Chung, 1983) si bien se han descrito muchos otros procedimientos como la asignación de valores mediante coeficientes de asociación, utilizando pruebas estadísticas como el test Chi-cuadrado, el coeficiente de contingencia (C y Cmax), el test de Kolmorov-Smirnov, la asignación directa a partir de criterio experto, etc., y de acuerdo con los niveles de confianza de los distintos coeficientes, se determinan la importancia relativa de los distintos parámetros.

La lógica booleana se ha aplicado por medio de unos operadores lógicos AND, OR, NOT para determinar si una condición es verdadera o falsa.

Esta metodología se ha empleado en la creación de mapas de probabilidad basados en la ausencia o presencia de cada variable en el territorio. Estos mapas expresan la densidad media de cada variable por celda 10 x 10 km² entendida como probabilidad

1.4 ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Las variables han sido analizadas a través de los mapas de interpolación y de probabilidad de presencia, generados anteriormente tal y como se ha descrito arriba.

Asimismo, se ha realizado un análisis de regresión simple a partir de la correlación lineal de pares de mapas, estudiando la relación entre ambos.

1.4.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN SIMPLE: COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON (R) Y COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R²)

Para analizar el tipo de relación entre las variables de estudio (X) y la concentración de ²²²Rn (Y) y comprobar la fuerza o el grado de asociación entre estos mapas se ha realizado un estudio mediante el coeficiente de correlación lineal Pearson.

Este coeficiente estudia el grado de asociación que hay entre las variables y el sentido positivo o negativo de su relación con el ²²²Rn.

Sus valores oscilarán entre +1 a -1: se aproxima a +1 si los mapas están altamente correlacionados (si aumenta la concentración de ²²²Rn también aumenta el valor de la otra variable); se aproxima a -1 cuando los mapas tienen correlación inversa (cuando aumenta la concentración de ²²²Rn disminuyen los valores de la otra variable); y si el valor es 0 señala que los mapas no están relacionados linealmente (U.V, 2016).

Pero también se ha comprobado la bondad del ajuste mediante la utilización del coeficiente de determinación (R²).

Sus valores oscilarán entre 0 y 1, cuanto más se acerque a 1 existirá un menor error de estimación.

Este coeficiente si se multiplica por 100 señala el porcentaje de variación de la variable dependiente (concentración de radón) que se ha estimado a través del resto de las variables. (U.V, 2016).

Se ha realizado también una representación gráfica de la nube de puntos del mapa de concentración de ²²²Rn con respecto al resto de mapas, para así observar mediante la recta de regresión el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación (R²), para comprobar si la regresión es válida y si los diferentes mapas de las variables de estudio se pueden utilizar para predecir las concentraciones de radón.

El organigrama de trabajo del proceso de análisis es el que se muestra a continuación (figura 3):

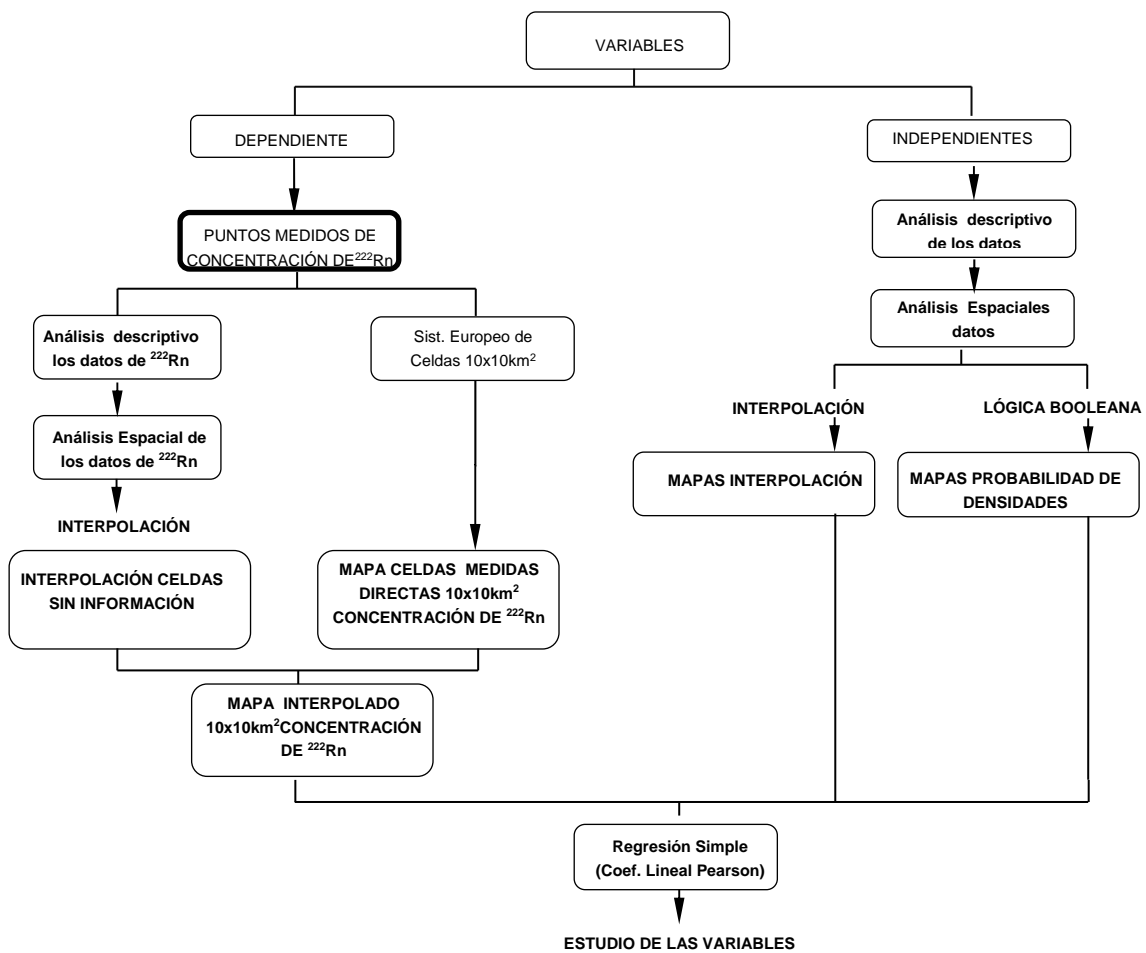


Figura 3: Esquema metodológico que ilustra el proceso/procedimiento de trabajo de este estudio

2

CARTOGRAFÍA DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS

2.1

CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn EN AIRE:EL SISTEMA EUROPEO DE CELDAS 10x10 Km².
MAPA ESPAÑOL DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn

Los datos referidos a las medidas de concentraciones de radón en el interior de las viviendas se obtuvieron del proyecto de Ampliación del Mapa Español del Radón, realizado en sucesivas campañas de muestreo. Éstas se realizaron entre los años 2011 y 2014, tras varios convenios de entre el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Universidad de Cantabria (UC), y en colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).

Este mapa se encuentra en permanente actualización con una incorporación de datos continua, por lo que a día de hoy se disponen de 10920 datos obtenidos en 5700 localidades de estudio.

En cada campaña de obtención de datos se definieron una serie de medidas a realizar en una superficie de 10 x 10 km², teniendo en cuenta criterios de superficie, poblacionales, litoestratigráficos, y de potencial de radón generado a partir del proyecto MARNA ([Sainz et al, 2014](#); [Suárez et al, 1997, 2000](#); [Quindós et al, 2004, 2008](#)). La decisión del número total de medidas a realizar en cada celda 10x10km² se tomó desde el CSN, teniendo en cuenta los objetivos generales establecidos para la creación de Mapa Europeo del Radón ([Dubois et al, 2010](#); [Tollefsen et al, 2011](#); [Boseew et al, 2015](#) ;[de Cort et al, 2011](#)).

Para poder trabajar con un GIS, y previo a la toma de datos, se definió el sistema de referencia en el que trabajar (Proyección GISCO-LAEA) y en consecuencia se generó una malla de 10 x 10 km de lado que permitió crear un sistema de celdas de 10 x 10 km².

Los 10920 datos puntuales de concentración de radón obtenidos se representaron en una superficie de celda de 10x10 km² usando la media aritmética, y obteniéndose

como resultado el Mapa de medidas directas de concentración de ^{222}Rn por celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$. Este mapa resultante tiene una serie de celdas cubiertas a partir de la información directa obtenida y unas celdas vacías (No Data) en las que no existe información. Se ha realizado un análisis descriptivo y espacial de estos datos para generar un modelo interpolado de concentración de ^{222}Rn que ha permitido asignar valor a las celdas vacías anteriormente mencionadas.

La agrupación de las celdas interpoladas y las celdas con medición directa ha permitido elaborar el Mapa de interpolado de concentración de ^{222}Rn final. Este mapa final es el empleado para correlacionarlo con el resto de mapas de variables generados.

La metodología de trabajo para la obtención de esta variable ha sido extensa tal y como se observa en la figura 4.

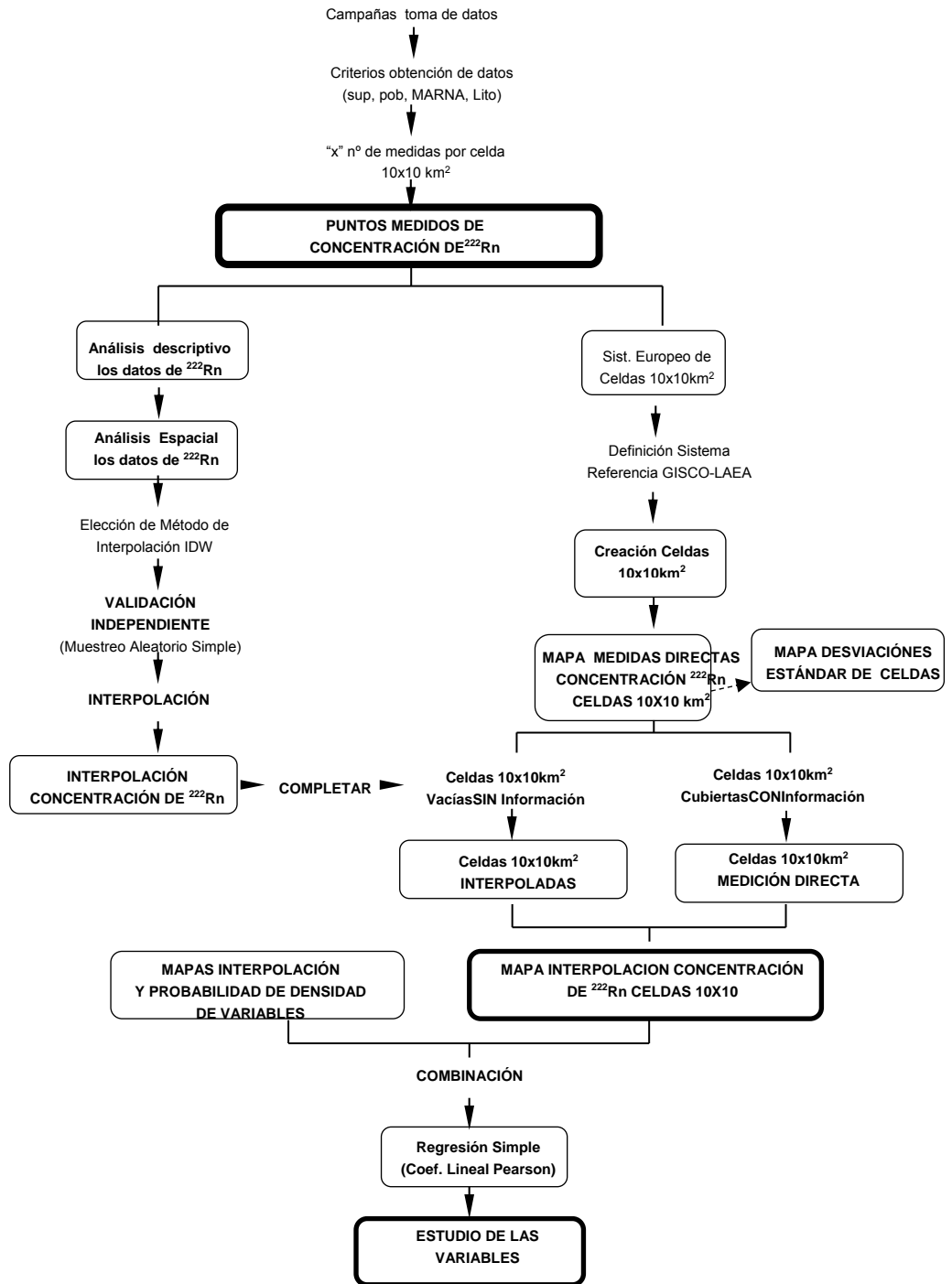


Figura 4: Metodología de trabajo para la obtención de la variable concentración de ²²²Rn en aire.

Numerosos estudios han demostrado que existe una clara correlación entre la exposición al radón en el interior de edificios y el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón (ICRP 2010, 2011). La inhalación continuada de radón en ambientes interiores se considera que es responsable de entre el 3 y el 14 por ciento de las muertes causadas por esta enfermedad en el primer mundo (IAEA, 2011; WHO, 2009), siendo la principal fuente de radiación ionizante (EURATOM 1990, 1996, 2013; ICRP, 1994). Por lo tanto, es crucial para determinar las áreas en las que existe una mayor probabilidad de encontrar edificios con altas concentraciones de radón, así como analizar las variables que afectan a las concentraciones de radón en el interior de edificios.

Una explicación a la gran variabilidad geográfica que muestra la concentración de radón en los interiores es la gran cantidad de factores que afectan a la presencia de radón en los edificios, tales como las características específicas de la roca sobre las que se construyen, la proximidad de las fallas activas, la permeabilidad y humedad del suelo, la meteorología, y la topografía, los materiales empleados en la construcción, las características de diseño de los edificios y los hábitos de vida de los ocupantes (García et al. , 2013a).

En la elaboración de este mapa de medidas directas se ha utilizado un sistema de información geográfica (GIS) que permitió capturar, almacenar, crear búsquedas, analizar y visualizar los datos estadísticos que se obtuvieron. Con el fin de adaptarse al diseño del Mapa Europeo del Radón en interiores, España siguió los parámetros marcados por la legislación nacional (CSN, 2012a; CSN 2012b) e internacional (ICRP 1993, 2009, 2014) que se relaciona con la legislación europea que tiene que ser aplicada en los Estados miembros antes de finales de 2018 (EURATOM 2013).

Este mapa será un instrumento útil para aplicar los requisitos de la legislación europea sobre el tema del radón en todos los niveles administrativos: nacional, regional y local, y a su vez, apoyará las políticas en materia de salud pública, y contribuirá a aumentar el conocimiento general del público de la dosis anual debida a la radiactividad natural.

2.1.1 MARCO DE TRABAJO: DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA Y CREACIÓN DE LA MALLA 10 x 10 Km²

Al tratarse de un proyecto a nivel europeo, y ante la necesidad de homogeneizar todas las medidas de los países miembros en un único sistema de referencia, la Joint Research Centre (JRC, Comisión Europea) sugiere trabajar con la proyección GISCO-LAEA (Geographic Information System of the Commission- Lambert Acimutal Equal Area) (Dubois et al, 2010;.Tollefsen et al, 2014). Se trata de una proyección planar, lo que significa que los datos incluidos en el mapa se proyectan sobre una superficie plana, por lo que las mediciones son homogéneas y se evita el llamado efecto frontera entre los diferentes países, que suelen utilizar sistemas de proyección distintos. Adicionalmente, se han tenido en cuenta los parámetros establecidos por el JRC para empezar a trabajar en este sistema GISCO-LAEA tal y como se muestra en la figura 5 (JRC-EC, 2010)

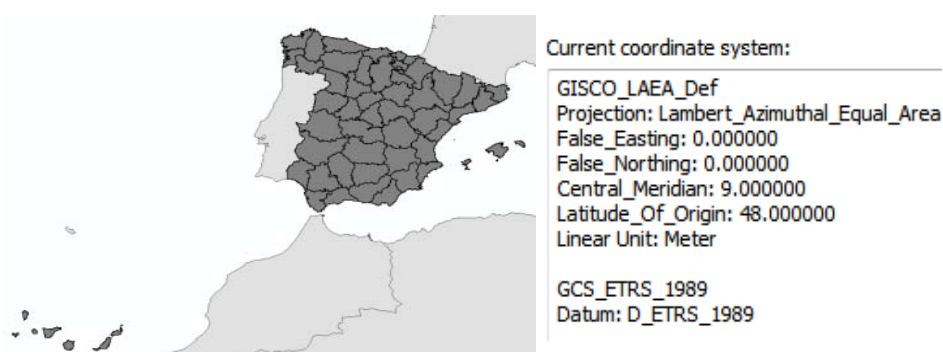


Figura 5: Parámetros de la proyección GISCO-LAEA utilizados.

Además, tal y como se explicara más adelante para asegurar la confidencialidad de las muestras obtenidas en las viviendas, la JRC facilitó unos puntos extremos de malla para las Islas Canarias y Península a partir los cuales se procedió a generar una retícula de 10x10 km de lado que cubría todo el territorio nacional (figura 6)



Figura 6: Puntos extremos de malla y retícula 10x10 km de lado.

Para definir el área de trabajo, se utilizaron los límites administrativos territoriales proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2014), generándose un total de 5478 celdas de 10x10 km². Para cada una de ellas se creó en la base de datos del GIS unos campos que recogían la información sobre el identificador de cada celda, las coordenadas (x, y) de su centroide, el número de medidas a realizar en cada celda, el número de medidas realizadas y el valor de los estadísticos que se asignarán a ese centroide (figura 7)

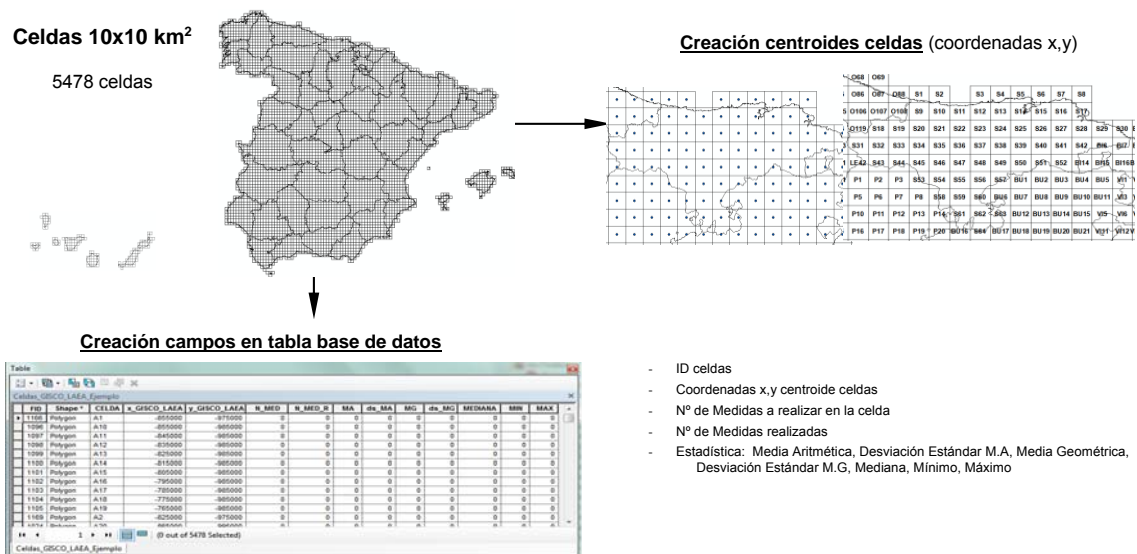


Figura 7: Proceso de creación de las celdas 10x10km²

2.1.2 OBTENCIÓN DE LAS MEDIDAS

Basándose en los datos obtenidos en diferentes campañas de medidas para la Ampliación del Mapa Español del Radón y recopilando medidas previas de las que disponía el Grupo Radón de la Universidad de Cantabria (UC), tomadas desde los años 80, se han obtenido un total de 9200 datos para todo el territorio nacional.

Estas campañas se realizaron entre los años 2011-2014, tras varios convenios entre el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la UC, en colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB)

Como este mapa se encuentra en permanente actualización, se han incorporado 1709 nuevas medidas desde 2014 por lo que a día de hoy se dispone de 10920 datos de concentración de ²²²Rn en 5700 localidades de estudio (figura 8).

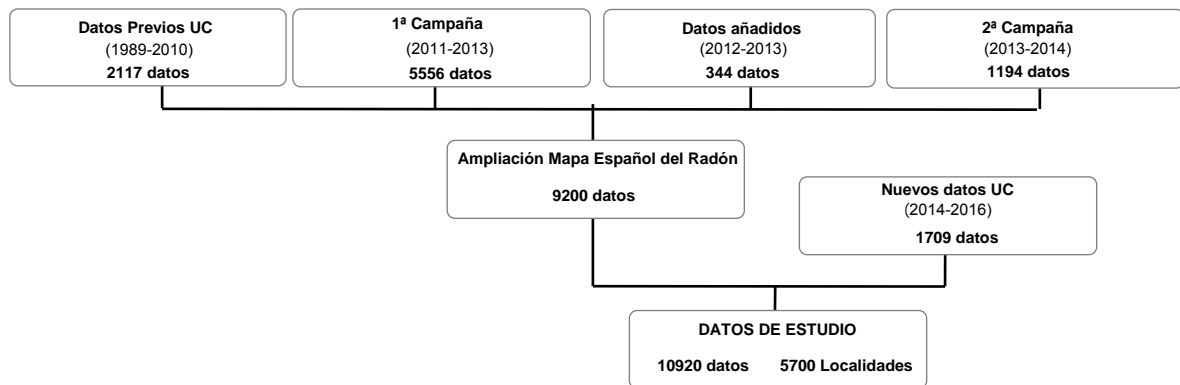


Figura 8: Campañas de obtención de medidas

1. CRITERIOS DE MUESTREO

La decisión del número de medidas a realizar en cada celda 10 x 10km² se tomó teniendo en cuenta la disponibilidad presupuestaria, sin olvidar aquellos aspectos que a continuación se muestran (figura 9):

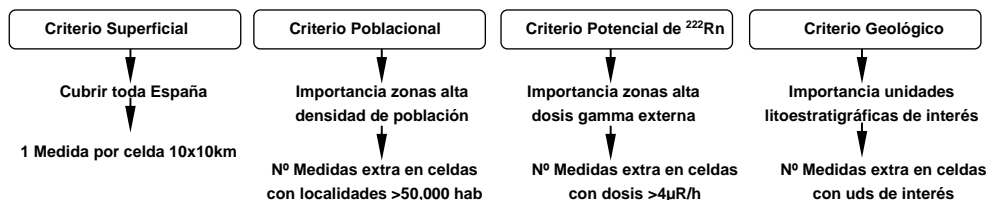


Figura 9: Criterios generales de muestreo de radón.

A) CRITERIO SUPERFICIAL

Se estableció que todo el territorio español tenía que estar cubierto al menos por una medida en cada celda 10x10 km². Del total de 5478 celdas resultantes de solapar la malla 10x10 km² con los límites territoriales españoles, y una vez realizada la intersección con la base poblacional (núcleos de población) del Instituto Nacional de Estadística Español (INE, 2014) se identificaron 478 celdas sin población. De este modo se realizaron 5000 medidas en 5000 celdas.

Se ha dado especial importancia a las zonas de alta densidad de población, por ello se debían realizar una serie de medidas extra en celdas con localidades de más de 50000 habitantes.

En la primera campaña de medidas, se estableció el criterio de realizar una medida adicional en cada celda por cada población que superase los 50.000 habitantes (según la base de datos del Instituto Nacional de Estadística español) (INE, 2014). Esto implicaba realizar 1000 medidas en 146 celdas.

En la segunda campaña este criterio se amplió para realizar un mínimo de 6 medidas en las celdas en las que apareciesen poblaciones de más de 200.000 habitantes. El resultado fue la obtención de 270 medidas en 90 celdas.

B) CRITERIO DE TASA DE DOSIS GAMMA EXTERNA (MARNA)

Por su carácter indicativo de la existencia de altos niveles de isótopos radiactivos naturales en el suelo, se prestó especial atención a las zonas con alta tasa de dosis de radiación gamma externa. Se estableció la necesidad de realizar medidas adicionales en celdas que superasen los 4 $\mu\text{R/h}$ (35 nGy/h).

Además, teniendo en cuenta la importancia del factor geológico, se decidió aumentar el número de medidas de radón en zonas con alto potencial de radón definidas a partir de los datos del proyecto MARNA (Suárez et al., 2000). La emisión potencial de radón se estimó considerando la correlación entre la concentración de ^{226}Ra en suelos y la dosis gamma externa obtenida. Este criterio se basó en las 7400 localizaciones obtenidas del proyecto MARNA en las que se habían realizado mediciones para determinar el potencial de emisión de radón. Estas localidades se vincularon al sistema de celdas 10x10 km².

En la primera campaña de medidas se decidió realizar dos medidas adicionales por cada localidad que superase los 35 nGy/h (4 $\mu\text{R/h}$) de exposición gamma. De este modo se tuvieron que realizar 2000 medidas en 3329 celdas (Sainz et al., 2014).

A lo largo de la segunda campaña, las medidas se concentraron en localidades con un nivel de exposición gamma entre los 65 y 122 nGy/h (7.5 y 14 $\mu\text{R/h}$) (riesgo medio), debiendo se realizar como mínimo 6 medidas en este tipo de celdas. En todo el

territorio nacional existen 1.655 celdas MARNA de este tipo, por lo que se tenían que realizar un total 9.930 medidas. Finalmente, el número de medidas realizadas por este criterio se redujo, principalmente debido a las limitaciones presupuestarias, a 960 medidas localizadas en 243 celdas. Para seleccionar estas 243 celdas las localidades MARNA se clasificaron en orden descendente en función de su exposición y se realizó un filtrado de las dosis más altas, manteniendo el mínimo de 6 medidas por celda. El resultado fue la realización de medidas en celdas entre 104 y 122 nGy/h (12 y 14 μ R/h).

C) CRITERIO LITOESTRATIGRÁFICO

Este criterio se fundamentó en la asociación de ciertas unidades litoestratigráficas a la posibilidad de encontrar altas concentraciones de radón, debido principalmente a la permeabilidad asociada a dichas unidades rocosas. Se propuso realizar un número de medidas adicionales en celdas que estuviesen asociadas a esas unidades litoestratigráficas de interés. La permeabilidad del suelo es parte de la naturaleza litológica de la roca, y numerosos estudios apoyan su importancia en la determinación del potencial de radón en el interior de edificios ([Kemski et al., 2001](#), [Tollefsen et al., 2014](#); [Garcia et al., 2013b](#)).

Para la representación de este criterio, se ha utilizado el mapa litoestratigráfico del Instituto Geológico y Minero de España ([IGME, 2014a, 2014b](#)) a escala 1:200,000, pues incluye el factor de permeabilidad de las unidades litológicas, agrupando las litoestratigrafías según valores de permeabilidad similares. Si bien, la permeabilidad del citado mapa del IGME tiene un sentido hidrogeológico, puede considerarse una aproximación razonable para afrontar este problema.

Así, siguiendo las propuestas de la JRC ([Bossew et al, 2015](#); [De Cort et al, 2011](#)) para el diseño del Mapa Europeo del Radón basándose en factores geológicos, se han identificado una serie de unidades de interés a partir de las unidades litoestratigráficas para diferentes regiones y se ha definido el número de medidas a realizar por municipio (base de datos municipal), tal y como se muestra en la Tabla 1 ([IGN, 2014](#)). (Tabla 1).

REGIÓN	LITOESTRATIGRAFÍA	Nº MEDIDAS	CRITERIO DE SELECCIÓN
Andalucía	130/131/133	40	En al menos 6 municipios distintos (que cubran las 3 unidades LE) con un mínimo de 6 medidas por municipio
Asturias	79/85/86/91	50	En al menos 8 municipios distintos (que cubran las 4 unidades LE) con un mínimo de 6 medidas por municipio
Aragón	104/117/369	40	En al menos 6 municipios distintos (que cubran las 3 unidades LE) con un mínimo de 6 medidas por municipio
Extremadura	7	30	En al menos 4 municipios distintos con un mínimo de 6 medidas por municipio
Cataluña	2/7/117/127	60	Al menos 3 municipios en la unidad 2, 3 municipios en la unidad 7 y 3 a repartir en las unidades 117 y 127. Con un mínimo de 6 medidas por municipio
País Vasco	152/153/173/174	50	En al menos 8 municipios distintos (que cubran las 4 unidades LE) con un mínimo de 6 medidas por municipio.
TOTAL		270	

Tabla 1: Medidas a realizar según región y litoestratigrafías

Con el fin de identificar las celdas afectadas por este criterio, se han superpuesto las unidades litoestratigráficas de interés con la base municipal y poblacional del IGN. De esta manera se tenían que realizar 270 mediciones en 90 celdas.

Las siguientes figuras 10 y 11 muestran el proceso de trabajo de ambas campañas de medidas.

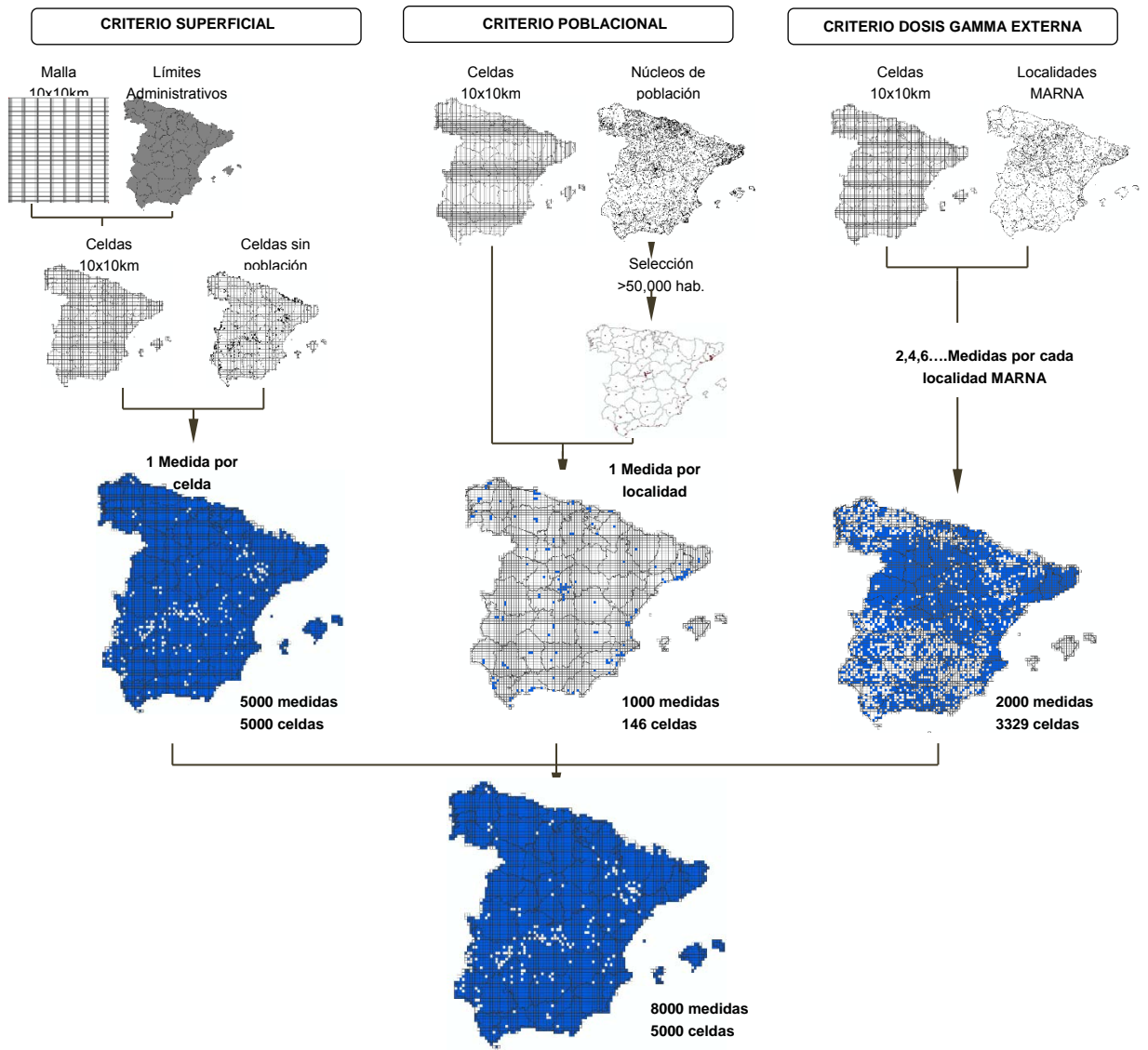


Figura 10: Metodología de trabajo de la primera campaña de obtención de medidas

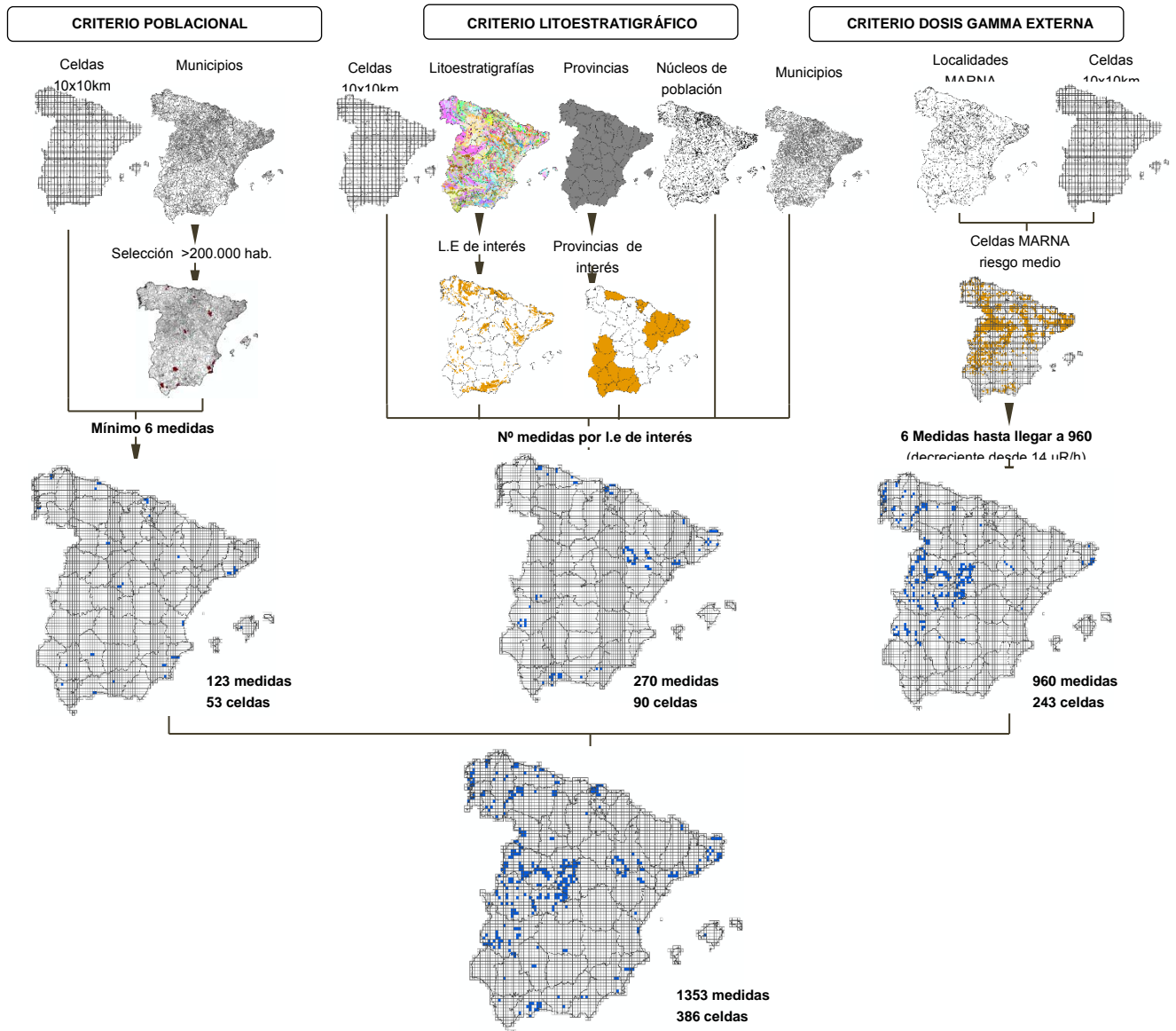


Figura 11: Metodología de trabajo de la segunda campaña de obtención de medidas

2. MEDIDAS DE EXPOSICIÓN AL RADÓN EN LAS VIVIENDAS

Una vez identificadas las celdas en las que se debían realizar las mediciones, la selección de las viviendas en las que realizar los ensayos se realizó de diferentes maneras:

En la primera campaña de medidas (años 2010-2012), mayoritariamente se seleccionaron localidades al azar dentro de cada celda, y se contactó por vía telefónica con los organismos e instituciones locales de la zona que fueron los encargados de distribuir los detectores a la población.

En la segunda campaña (años 2013-2014) la selección de las localidades fue más restrictiva debido a la necesidad de recopilar información sobre litoestratigrafías de interés, por lo que a los organismos e instituciones locales se les informó específicamente acerca de las localidades en las que se debían realizar las medidas.

Las medidas se realizaron utilizando detectores de trazas CR-39 (figura 12), similares a los empleados con anterioridad a 2010. Durante un período de exposición de entre 3 y 6 meses, en viviendas de planta baja o primeras plantas, siguiendo el protocolo de actuación, colocando el detector en la sala más frecuentada a una altura de entre 1 y 2 m en una estantería o armario separado de la pared y evitando que quedase expuesto a corrientes de aire o focos de calor.

El detector consiste en un recipiente plástico que contiene en su interior adherido a la tapa un detector CR-39, un polímero plástico (allyldiglycol carbonate) que tiene la propiedad de quedar marcado con trazas microscópicas debidas a la interacción con las partículas alfa emitidas por el gas radón y sus descendientes de vida corta.



Figura 12: Detector CR-39

El contenedor de plástico actúa como una cámara simple de difusión de radón que excluye los descendientes del radón y evita el deterioro del detector protegiéndolo del polvo, de manera que evita la entrada de humedad pero permite la entrada de radón. Las dimensiones del contenedor donde se aloja el detector son de aproximadamente 55 mm de alto y 35 mm de diámetro.

Una vez expuestos los detectores entre 3 y 6 meses, se trasladan al laboratorio para llevar a cabo el proceso de revelado químico y la lectura de las trazas que se han generado en el detector como consecuencia de su exposición al radón presente en el ambiente. Para traducir el número de trazas que posee el detector, en términos de exposición o de concentración de gas radón, se realiza una conversión a través de un factor de calibración F , definido como la relación entre las trazas por milímetro cuadrado medidas y la exposición a la que han estado sometidos los detectores expresada en $\text{kBq/m}^3\text{h}$, obteniéndose la concentración promedio (Bq/m^3) sin más que dividir la exposición por el tiempo.

Cada detector se distribuyó junto con las instrucciones de colocación, un formulario (figura 13) para recabar información adicional sobre la vivienda y los hábitos de los ocupantes de la misma, un CD informativo, unas cartas explicativas y un sobre franqueado para la devolución del detector.

Una vez realizada la medida, se envió un escrito a cada colaborador, informando del nivel de radón en el edificio e incluyendo recomendaciones para reducir la concentración si se considerara alta.

PROYECTO RADÓN **FICHA DE IDENTIFICACION**

Persona de contacto:

Nombre: _____ Primer apellido: _____
 Segundo apellido: _____

Calle, Pasa: _____ Nº: _____ Piso: _____ Letra: _____
 Código Postal: _____ Población: _____
 Dirección e-mail: _____

Introducir el código que aparece en el bote de plomo: →

DETECTOR (CÓDIGO): _____
 FECHA COLOCACIÓN: día mes año
 FECHA RETIRADA: día mes año

Localidad en la que fue colocado: _____ Provincia: _____

TIPO DE VIVIENDA: Unifamiliar: sí/no Casa adosada: _____ Piso: _____
 EDAD APROXIMADA DE LA VIVIENDA (AÑOS): _____

TIPO DE HABITACIÓN O LUGAR EN EL QUE ESTUVO COLOCADO EL DETECTOR:

Exterior: _____ Sala de estar: _____
 Cocina: _____ Pasillo: _____
 Baño: _____ Otro (especificar cuál): _____

¿QUE PLANTEL DE LA CASA Y SU TIPO (PISO)?

1 por debajo del nivel de la calle 0 nivel de la calle 1 2 3 PISO (Escribirlo)

¿Número de plantas que habitan en la vivienda? _____

Descripción del tipo de construcción (puede haber, albañilería, etc.): _____

¿Observaciones? _____

DATOS DE LA PERSONA RESPONSABLE:

Profesión: _____
 ¿Ocupación que ha desarrollado durante un mayor nº de años? _____
 ¿Padeció alguna enfermedad respiratoria? Sí No ¿Cuál? _____
 ¿Antecedentes familiares con cáncer de pulmón? Sí No _____
 Parado: Sí/No Especifico: Batinal
 P.e. fundador: Sí/No Especifico: Batinal
 Nº de cigarrillos diarios: _____
 Tiempo sin fumar: _____
 Edad de inicio: _____
 Edad de finalización: _____
 Tipo de tabaco: Rollos Negro Indistinto

Mencione en los espacios en blanco, con una cruz, con un dote o con una línea (*)

Figura 13: Formulario

El Laboratorio de Radiactividad de la Universidad de Cantabria (LaRUC) se encuentra validado para llevar a cabo este tipo de medidas por la PHE (Public Health England, UK) teniendo que superar controles periódicos de calidad cada seis meses, además de evaluar la calidad de la calibración del detector por medio de ejercicios de intercomparación a nivel nacional e internacional de manera continua (Gutiérrez-Villanueva, 2011, 2015). También se encuentra certificado en la norma ISO 9001 y más recientemente ha conseguido la acreditación ISO 17025, ENAC para medidas de radón en aire, utilizando CR-39.

2.1.3 ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS

La información obtenida a partir de las mediciones realizadas en las viviendas se ha almacenado en cada una de las celdas 10x10 km, que contienen información sobre su código de identificación, su centroide (coordenadas x, y) y el número de medidas a tomar y tomadas (figura 14).

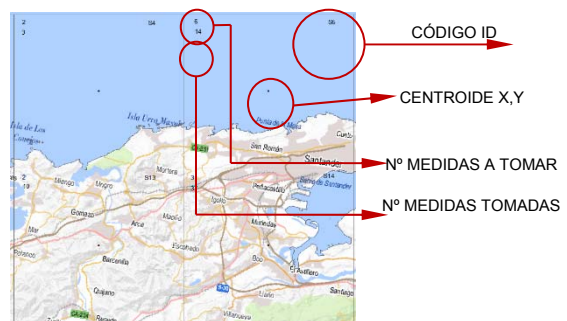


Figura 14: Almacenamiento de la información en las celdas

A modo de ejemplo se explica la metodología de almacenamiento de la información en el siguiente caso práctico reflejado en la figura 15: En la celda S5 se requerían realizar 6 medidas y se realizaron 12 en varios núcleos de población contenidos en ella. Se recibieron 6 detectores de diferentes viviendas del barrio de Cueto. Por motivos de confidencialidad no se identifican estas medidas por calle, portal y/o vivienda, si no que se asignan a una entidad puntual correspondiente al centro aproximado del núcleo de población al que se añade su centroide mediante coordenadas x e y.

Cada resultado se almacenó utilizando la base de datos del Sistema de Información Geográfica incluyendo: el código de identificación de cada detector; el resultado de la medición (en Bq/m³); el tiempo de exposición del detector, la localidad en la que se realizó la medida junto con sus coordenadas y la celda correspondiente en la que se encuentra la localidad. A partir de esta información, se obtuvo una serie de estadísticos para cada celda en la hoja de cálculo Excel: número de medidas realizadas, media geométrica, media aritmética, mediana, valores mínimos y máximos y las desviaciones estándar.

Posteriormente esta estadística de Excel se ha vinculado a la base de datos del GIS, mediante la asignación de estos datos a las coordenadas "X" e "Y" de los centroides de cada celda. De esta manera se asegura el anonimato de los colaboradores del proyecto, ya que los datos originales con respecto a la ubicación exacta de los edificios no se muestran en el mapa.

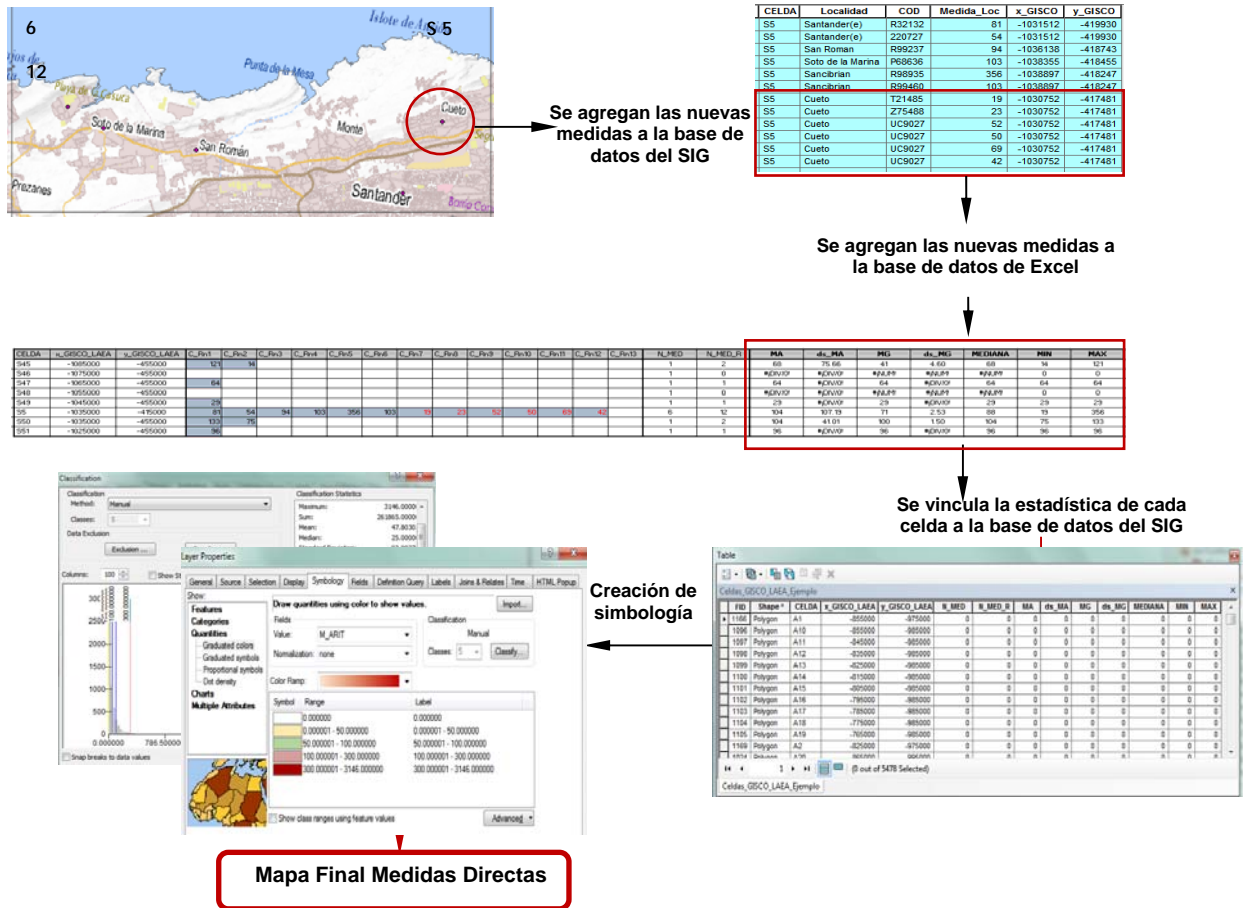


Figura 15: Metodología de almacenamiento de los datos.

2.1.4 REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE LOS DATOS

Las diferentes campañas de muestreo permitieron obtener 10920 medidas de concentración de ²²²Rn en viviendas españolas. A partir de estas, se realizó el mapa de medidas directas de concentración de ²²²Rn por celdas 10 x 10 km².

Pero la realización de estas campañas no consiguió cubrir toda la superficie de España con al menos una medida. Se observó que existían celdas en las que no se habían realizado mediciones. Por este motivo se ha realizado un mapa de interpolación que representa de manera espacialmente continua la concentración de radón en la península, cubriendo las celdas del mapa de medidas directas de concentración de ²²²Rn por celdas 10x10 km² en las que no existe medición: en los píxeles en los que no existe información se utilizaran los píxeles generados en la

interpolación, mientras que en los píxeles en los que existen valores puntuales se emplea el dato de la medida directa.

1. ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PIXEL Y CAMPO A MODELIZAR

Asociada a la elección del método de interpolación y a las limitaciones de los datos de partida está la elección del tamaño de píxel, pues se tiene que tener en cuenta un aspecto tan importante como cuál es la escala de análisis a la que se quieren representar los datos.

Como se ha explicado anteriormente, la Comisión Europea tiene definido un único sistema de referencia para todo Europa (el GISCO-LAEA) y un sistema de celdas de 10 x 10 km² en el que se agregan las medidas realizadas de diferentes proyectos, entre ellos el Atlas Europeo de Radiación Natural (Dubois et al., 2010; Tollefsen et al, 2011, 2014; .Boseew et al, 2015;de Cort et al, 2011). Para trabajar en un único marco de trabajo y poder realizar comparativas futuras se realizó la interpolación de las diferentes variables ajustándose a este sistema de celdas para un tamaño de píxel de 10 x 10 km²

2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN

Para realizar una valoración inicial del método de interpolación más adecuado, se realizó una comparativa de las dos técnicas más habitualmente utilizadas en la realización de este tipo de estudios, que resultan ser el IDW y el Kriging.

3. ELABORACIÓN DEL MODELO DE INTERPOLACIÓN DE RADÓN: VALIDACIÓN INDEPENDIENTE DE LOS DATOS

Una vez tomada la decisión de la técnica a utilizar en la interpolación de los datos de concentración de ²²²Rn, se ha elaborado y evaluado el grado de acierto del modelo, y por extensión de la técnica de interpolación, realizando una validación independiente de los datos a partir un muestreo aleatorio simple: se convirtieron los datos puntuales a formato ráster con un tamaño de píxel de 10 x 10 km², ajustándose al sistema de celdas anteriormente descrito.

Se seleccionó el 60% de los datos para su utilización como datos de análisis y el 40% restante fue reservado para la validación. A partir del 60% de los datos de análisis se generó un modelo de interpolación, dando como resultado un ráster continuo de la península que ofrece un valor interpolado para cada celda de 100 km² del territorio. Este ráster se combinó con el ráster del 40% de la muestra independiente para su comparación.

Esta interpolación se utilizó para cubrir las celdas del mapa de medidas directas de concentración de ²²²Rn por celdas 10x10 km² sin información, mientras que en las celdas en las que existían valores muestreados se empleó el dato de la medida directa.

El mapa resultante de la combinación de los datos directos y datos interpolados es el Mapa interpolado de concentración de ²²²Rn final, a partir del cual se analizaron el resto de las variables del presente estudio.

2.2

TASA TOTAL DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL

Los datos referidos a la tasa de radiación gamma terrestre se obtuvieron a partir del proyecto MARNA (Suárez et al., 1997), elaborado mediante la realización de medidas aéreas y terrestres, aplicando diferentes técnicas de análisis que posteriormente fueron correlacionadas. Son 7424 valores puntuales de tasas de radiación gamma externa expresadas en µR/h.

La metodología de trabajo para la elaboración del mapa de tasas de exposición gamma total es la que se muestra en la figura 16.

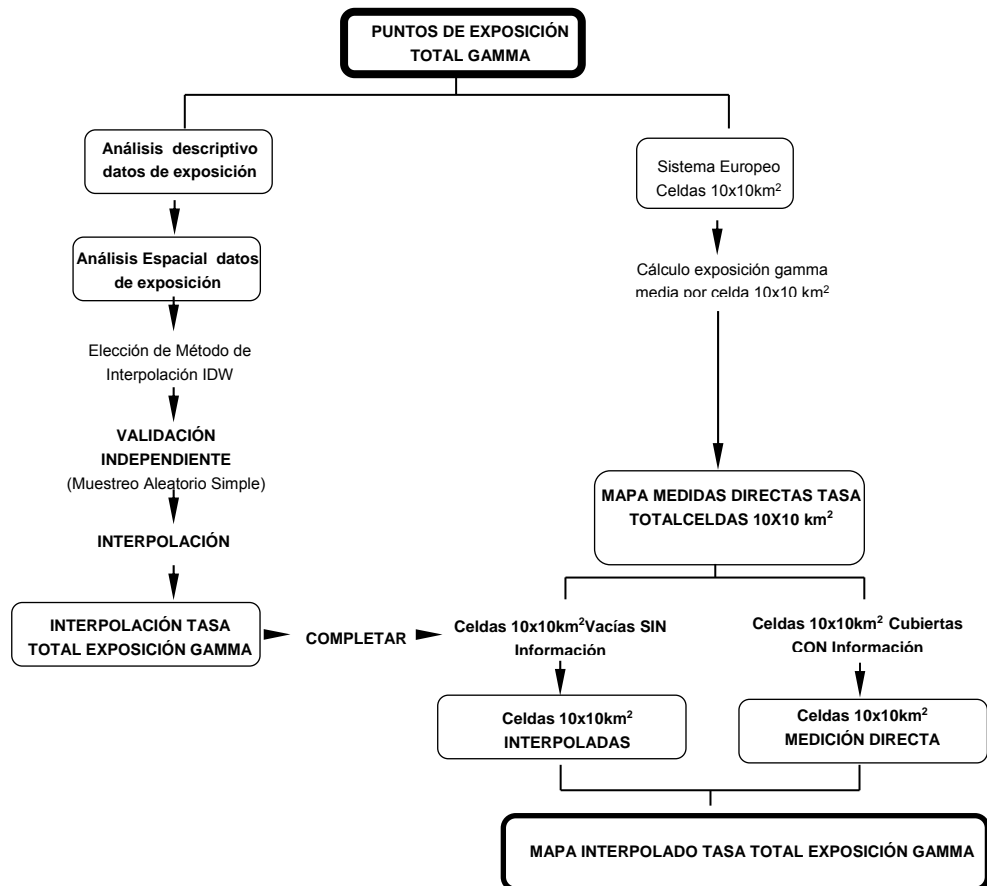


Figura 16: Metodología de trabajo de la variable tasa exposición gamma total.

Como se ha explicado anteriormente, el mapa de exposición a la radiación gamma a nivel nacional (MARNA) se elaboró a partir de una técnica de interpolación tipo kriging, pero en la documentación del proyecto no se da información sobre el tipo de transformación utilizada o de los parámetros introducidos para la realización de esta interpolación.

La representación espacial de los datos se realizó con el mismo procedimiento que en el caso de las concentraciones de radón: a partir de los valores puntuales de tasas de radiación gamma se generó un mapa de medidas directas. Al no tener todas las celdas una medición, se realizó una interpolación de los datos que permitió cubrir las celdas en las que no existe información. De este modo mediante la combinación de los datos directos y datos interpolados se generó el mapa interpolado de tasas exposición gamma total.

2.2.1 CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE ²²⁶Ra EN SUELOS

A partir de los datos puntuales de la tasa de exposición gamma total se estimó la concentración del ²²⁶Ra en suelos, considerando la ecuación definida en la publicación del mapa predictivo de exposición al radón en España ([García et al., 2013a](#)):

$$CRa = 5.3 * T_{total} - 2.39$$

Donde

CRa = Concentración de ²²⁶Ra en suelos (Bq/kg)

T total= Tasa de exposición gamma total (μR/h)

Esta expresión tiene como origen la ecuación del proyecto MARNA ([Suárez et al., 1997](#))

$$T_{total} = 0.0048 * CK + 0.051 * CRa + 0.076 * CTh$$

Donde

T total= Tasa de exposición gamma total (μR/h)

CK= Concentración de ⁴⁰K (Bq/kg)

CRa=Concentración de ²²⁶Ra (Bq/kg)

CTh=Concentración de ²³²Th (Bq/kg)

A partir de ella se obtuvo un factor de conversión para el ²²⁶Ra, de actividad a tasa de exposición:

$$T_{226Ra} = 0.051 * CRa$$

Donde

T_{226Ra} = Tasa de exposición del ²²⁶Ra (μR/h)

CRa = Concentración de ²²⁶Ra en suelos (Bq/kg)

Esta equivalencia también tiene su base en medidas experimentales que permitieron definir la relación entre la tasa de exposición gamma total y la contribución del ²²⁶Ra a ésta ([García et al., 2013a](#)):

$$T_{226Ra} = 0.2703 * T_{total} - 0.1219$$

Donde

T_{226Ra} = Tasa de exposición del ²²⁶Ra (μR/h)

T total= Tasa de exposición gamma total (μR/h)

Una vez calculados los datos estimados de concentración de ^{226}Ra a partir de los 7424 datos puntuales de tasa de exposición gamma total, se realizó el mapa de medidas directas de concentración de ^{226}Ra en suelos.

Del mismo modo que en los casos anteriores, al no tener todas las celdas una medición, se realizó una interpolación de los datos que permitió cubrir las celdas en las que no existe información. Se efectuó una validación independiente de los datos en la cual se comprueba que el método de interpolación es efectivo.

Una vez aceptado el modelo de interpolación, se empleará para asignar valores a las celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$ sin información, mientras que en las celdas para las que se disponía de valores puntuales se empleó el dato de la medida.

El mapa resultante de la combinación de ambos datos es el mapa interpolado de concentración de ^{226}Ra en suelos. Este mapa permitirá estimar la concentración de ^{226}Ra en suelo descartando zonas particulares con presencia de altas concentraciones de ^{40}K y ^{232}Th que no contribuyen a la presencia del ^{222}Rn en las viviendas.

La metodología de trabajo para la concentración ^{226}Ra en suelos es la que sigue (figura 17)

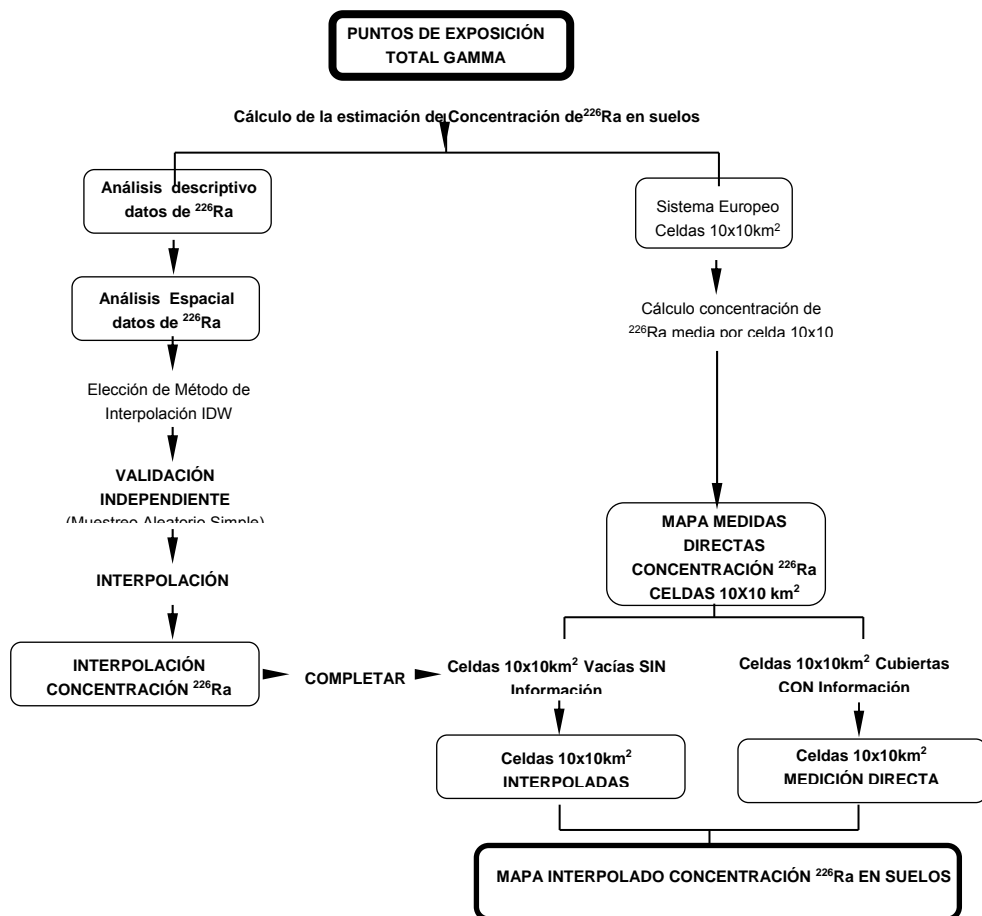


Figura 17: Metodología de trabajo de la variable concentración estimada de ^{226}Ra en suelos.

2.3

PRESENCIA DE YACIMIENTOS DE URANIO

La presencia de ^{226}Ra en suelos suele relacionarse directamente con la presencia de materiales uraníferos. Por ello se utilizó la base de datos de recursos minerales del IGME (IGME, 2016) que contiene información geológica minera sobre indicios y explotaciones de rocas y minerales de España. Se consultó en la base de datos de metalogenia las asociaciones minerales relacionadas con el uranio y elementos radiactivos. Para disponer de información en formato vectorial de tipo puntual se localizaron espacialmente los 126 yacimientos de uranio presentes en la península.

De este modo y generando un radio de acción (buffer) de 20 km a partir de esos puntos (figura 18), se analizaron las concentraciones de radón, con el fin de tener una primera aproximación a la vinculación entre la presencia de esta variable y la concentración de radón en viviendas.

Se estima esta área de influencia debido a que los yacimientos en sí mismos son por lo general de pequeñas dimensiones (cientos de metros), pero las mineralizaciones pueden encontrarse presentes en kilómetros a la redonda y se distribuyen de forma discontinua en el territorio. (Arribas, A. 1975; Pérez del Villar, L., et al 1989)

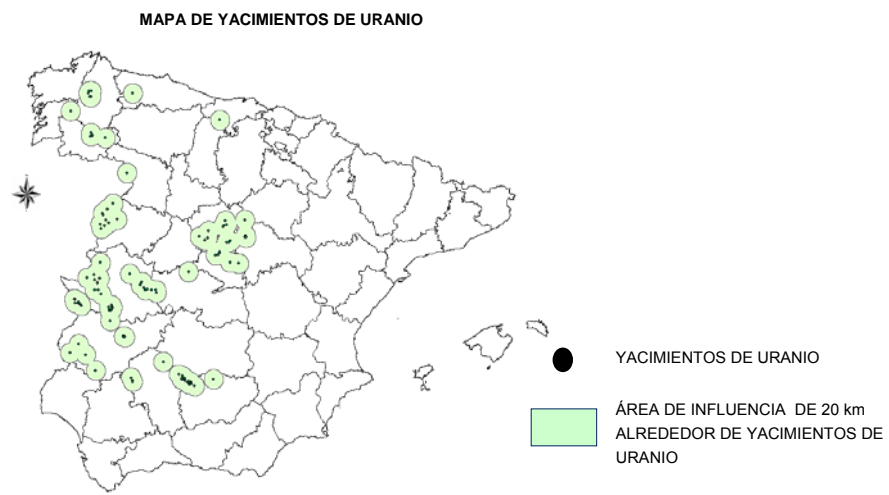


Figura 18: Yacimientos de uranio y área de influencia de 20 km. Elaboración propia. Fuente: IGME.

Al no disponer de datos cuantitativos para modelizar esta variable mediante métodos de interpolación, se realizó un mapa de probabilidad de densidades. Este mapa se basa en la probabilidad de ocurrencia de yacimientos de uranio en la superficie de un

píxel de 10x10 km, expresada como la proporción (tantos por uno) de la superficie total del píxel ocupada por el yacimiento. De esta manera se realizó el mapa con un rango de valores entre el 0 (ausencia de yacimientos) y 1 (todo el píxel es un yacimiento), para un tamaño de píxel de 100 km², ajustándose al sistema de celdas europeo.

La metodología de trabajo se muestra en el diagrama de flujo de la figura 19

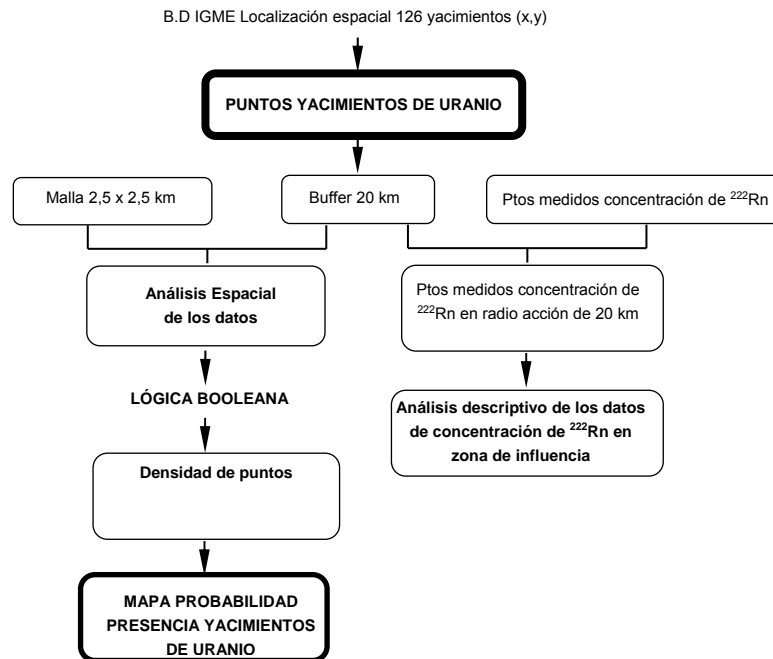


Figura 19: Metodología utilizada para la variable yacimientos uraníferos.

2.4

PRESENCIA DE FALLAS

Como punto de partida se empleó el mapa de fallas a escala 1:1,000,000 del IGME (IGME, 2016a) desarrollado en el marco del proyecto One Geology. Se dispone de información en formato vectorial de tipo lineal, por lo se generó un corredor de influencia (buffer) de 200 m desde las fallas (figura 20) pues es aproximadamente en esta área en donde se pueda ver su influencia respecto a la presencia del ²²²Rn (Rengifo, M et al., 2015).

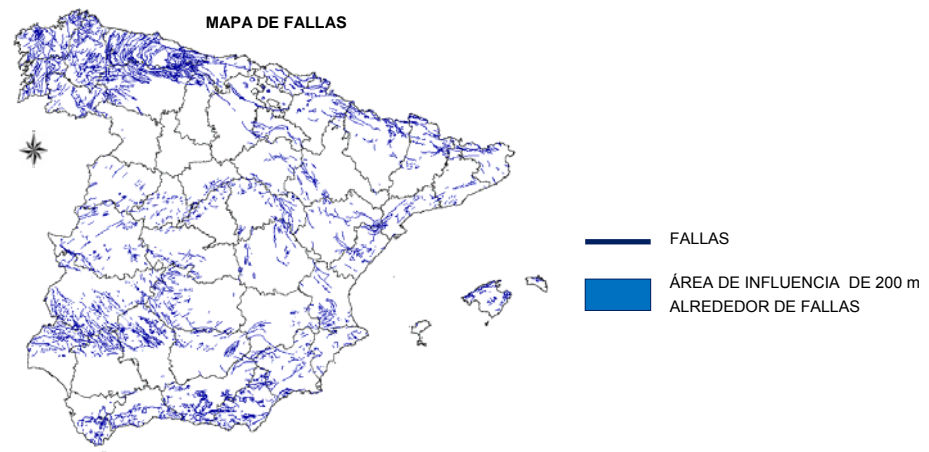


Figura 20: Fallas y área de influencia de 200 m. Elaboración propia. Fuente: IGME

Con la misma finalidad que en el caso de los yacimientos de uranio, a partir de esa banda de influencia se analizaron los datos puntuales de concentración de radón respecto a su proximidad a las fallas.

El mapa de probabilidad de densidad de fallas también se generó a partir de los datos lineales del mapa de fallas 1:1,000,000 y su área de influencia de 200 metros. El modelo se obtuvo con un tamaño de píxel 100 km^2 ajustándose a las celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$ para obtener valores que oscilan entre 0 y 1, dependiendo de la mayor o menor presencia de fallas en esa superficie.

La metodología de trabajo de esta variable se muestra en la figura 21.

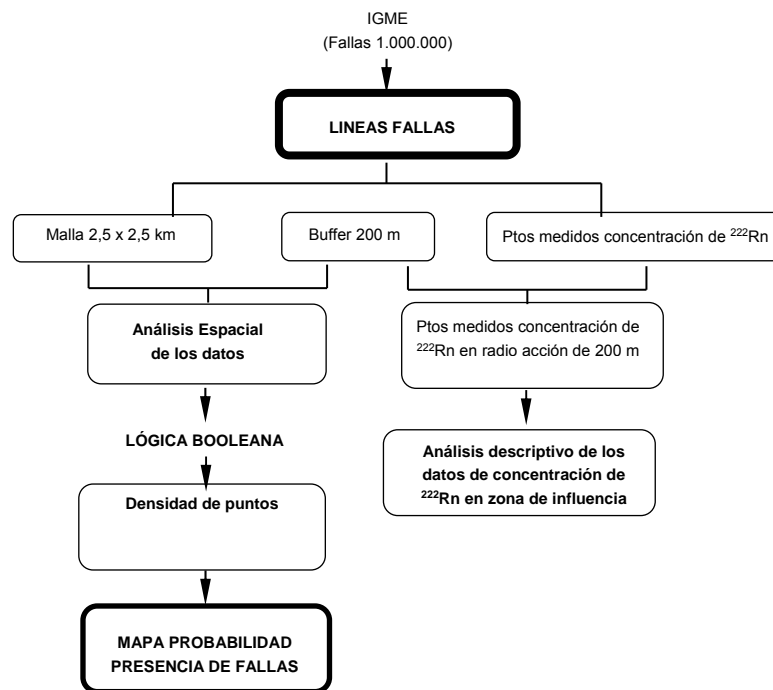


Figura 21: Metodología de trabajo de la variable presencia de fallas.

2.6

PRESENCIA DE MATERIALES ARCILLOSOS

Se empleó el mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas a escala 1:1.000.000 del IGME (2016b) que muestra la distribución geográfica de las zonas en las que se presupone una expansividad similar para las arcillas (figura 22). El IGME clasifica las unidades arcillosas en cuatro grupos, según sus expansividad: nula a baja, baja a moderada, moderada a alta y alta a muy alta. Las unidades tienen asignada la edad (4 tipos) y la litología (7 tipos).

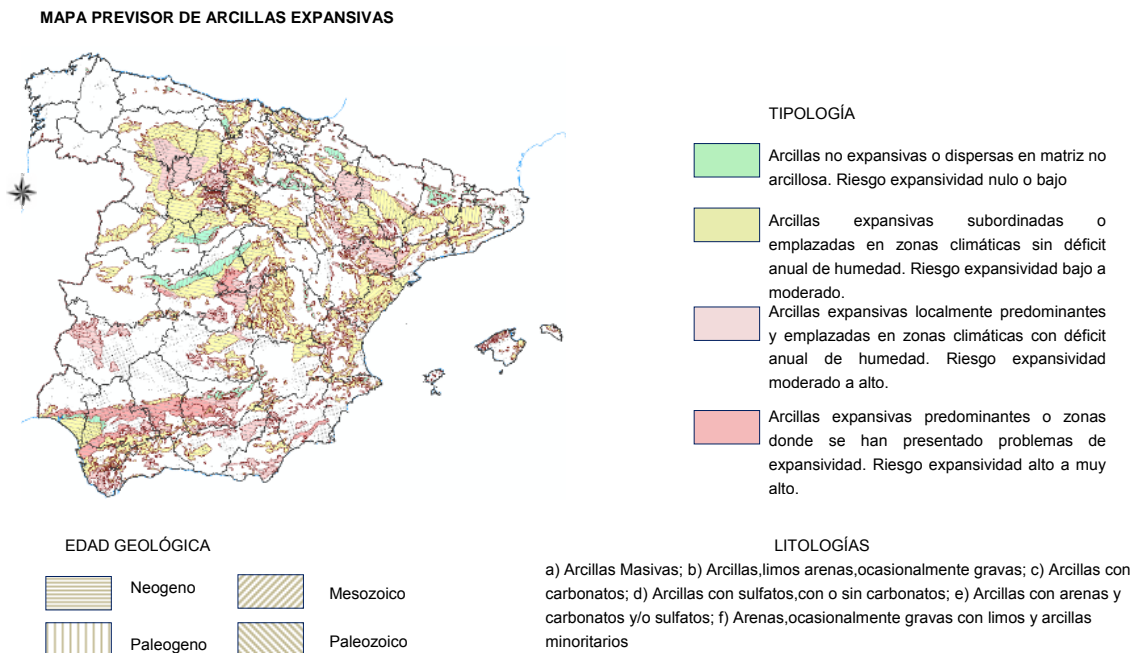


Figura 22: Mapa de presencia de arcillas expansivas. Elaboración propia .Fuente: IGME.

El IGME no facilita datos numéricos que puedan servir para cuantificar (asignar valores numéricos) a los materiales arcillosos. En esta ocasión solo se disponía de los datos ráster en continuo (imagen) del servidor del IGME, los cuales únicamente permiten la consulta pero no el manejo de la información. En este caso, la metodología de trabajo es diferente a anteriores variables de las que se disponía de información en formato vectorial de tipo puntual o lineal.

La manera de poder manipular estos datos fue recortar el ráster continuo con los límites territoriales de España. Una vez realizada esta operación, la imagen se reclasificó en dos categorías: valor 1 presencia de materiales arcillosos y valor 0 ausencia de materiales arcillosos y se transformó a formato vectorial tipo polígono (figura 23).

A partir de esta capa se realizó el análisis descriptivo de los datos mediante la comparativa de las concentraciones de ^{222}Rn obtenidas sobre materiales arcillosos y las que no se encontraban sobre estas formaciones. Análogamente, a lo realizado con

otras variables, se obtuvo así una primera evaluación de la posible relación entre esta variable y las concentraciones de radón en aire medidas.

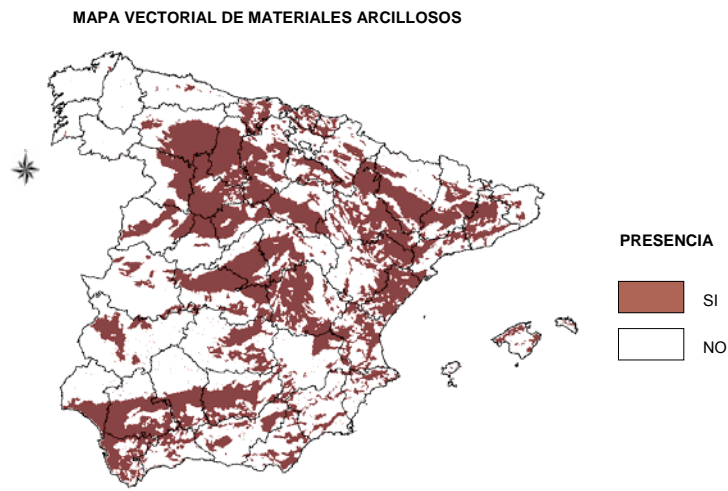


Figura 23: Mapa vectorial de presencia de materiales arcillosos.

Para realizar el modelo de probabilidad de densidades fue necesario crear una malla de puntos de $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ que cubría toda la península ibérica ajustándose al sistema de celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$ (figura 24). De esta manera se cubre cada celda $10 \times 10 \text{ km}^2$ con la densidad de puntos necesaria para identificar la ausencia o presencia de la variable. Se generaron 160,000 puntos.

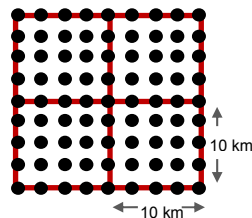


Figura 24: Sistema de malla $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$

Con esta malla, se realizó la intersección con los polígonos en vectorial que indicaban la ausencia o presencia de materiales arcillosos. El resultado es una capa con información numérica de presencia (valor 1) y ausencia (valor 0) de arcillas (figura 25). A partir de esta capa numérica se realizó el Mapa de probabilidad de presencia de arcillas basado en la densidad de puntos con valor 1 (presencia) para cada celda $10 \times 10 \text{ km}^2$

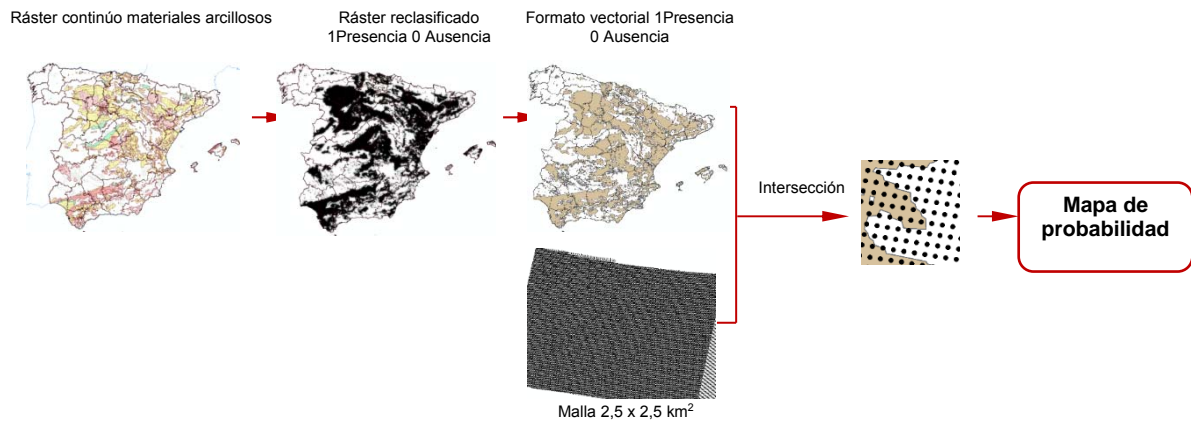


Figura 25: Proceso de trabajo en la elaboración del mapa de densidades

El esquema de la metodología empleada en esta variable se muestra en la figura 26.

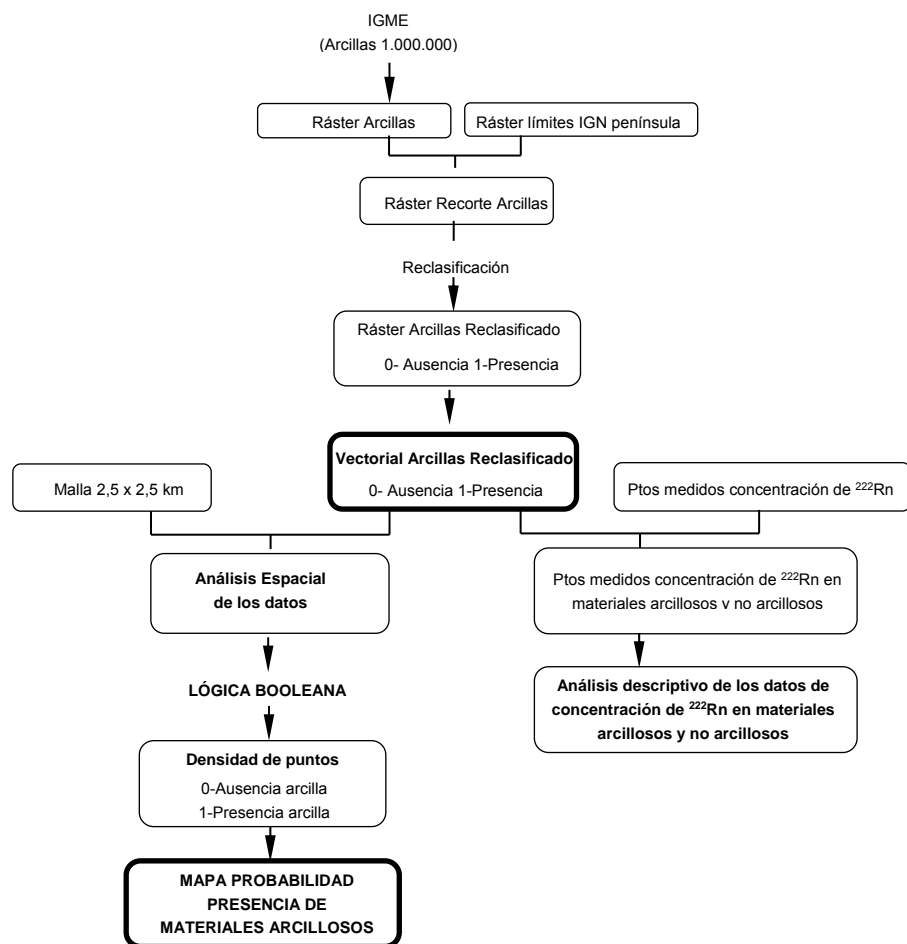


Figura 26: Metodología de trabajo de la variable materiales arcillosos.

2.6

PRESENCIA DE MATERIALES DEL CUATERNARIO

Para el estudio de esta variable se empleó el mapa a escala 1:1,000,000 de materiales cuaternarios (IGME, 2016c), con los depósitos datados desde el Plio-Pleistoceno hasta los contemporáneos (figura 27). El IGME los clasifica en 10 intervalos geocronológicos separados en función de su génesis. El mapa incluye entidades glaciares, volcánicas, kársticas, eólicas, litorales, edáficas, paleontológicas y prehistóricas.

MAPA DE MATERIALES DEL CUATERNARIO

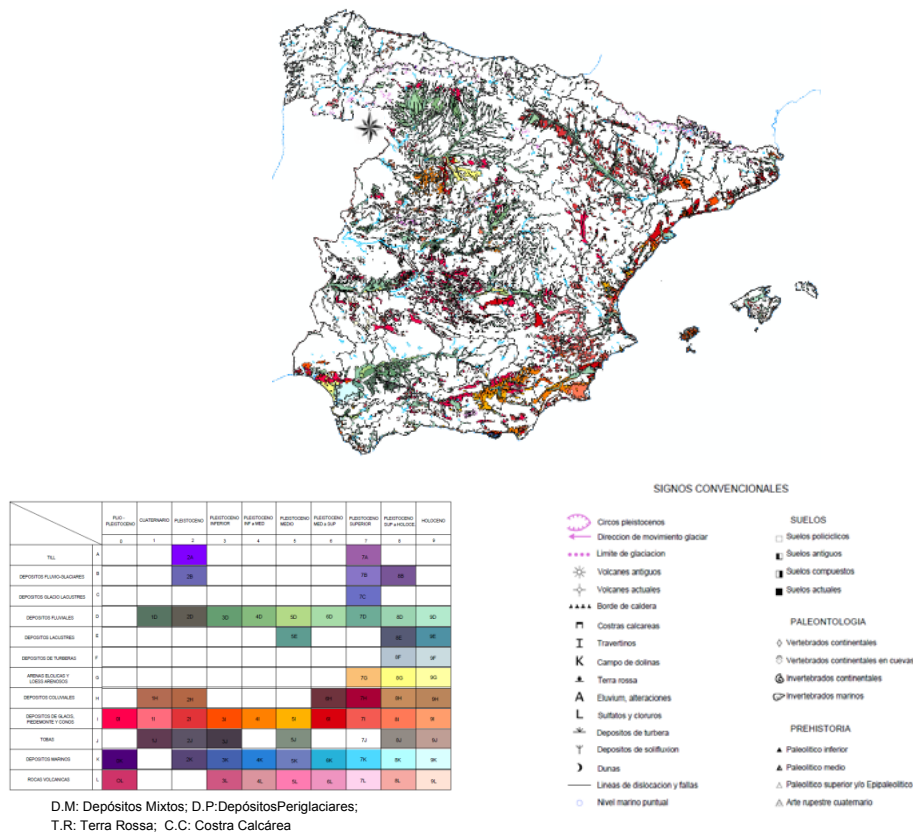


Figura 27: Mapa de materiales del cuaternario. Elaboración propia. Fuente: IGME.

Del mismo modo que en el caso de materiales arcillosos, no se dispone de datos numéricos para caracterizarlos materiales cuaternarios, por lo que la metodología de trabajo es la misma que en ese caso anterior (ver figura 26). Se realizó el Mapa de probabilidad de presencia de materiales cuaternarios basado en la intersección de los

puntos de la malla de 2,5 x 2,5 km² con la capa en vectorial de los polígonos de estos materiales cuaternarios (figura 28).

Al igual que anteriormente, también se compararon las concentraciones de ²²²Rn obtenidas sobre materiales del cuaternario y las que no se encontraban sobre estos materiales, mediante la intersección de la capa en vectorial con los puntos medidos de concentración de ²²²Rn.

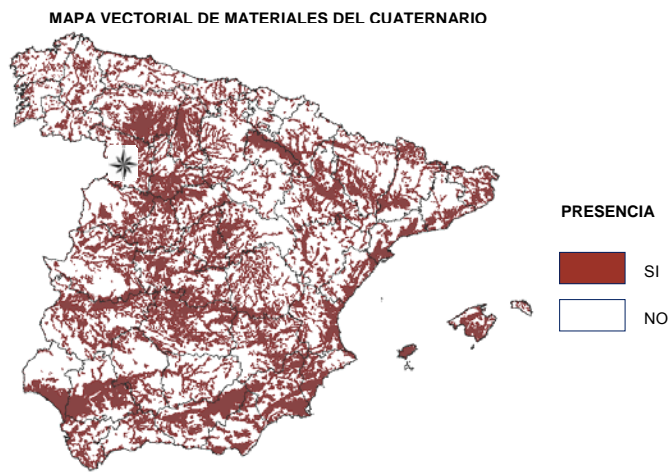


Figura 28: Mapa vectorial de presencia de materiales del cuaternario.

2.7

PRESENCIA DE FORMACIONES KÁRSTICAS

Como base para trabajar con datos de las formaciones kársticas se empleó el mapa del karst 1:1.000.000 del IGME ([IGME, 2016d](#)) en el que se representan las diferentes litologías karstificables, indicando su tipo (carbonatos, yesos y detríticos), y la intensidad de karstificación en cada caso. Este mapa también incluye cuevas, poljes, surgencias y otras entidades hidrogeológicas y geomorfológicas vinculadas a los procesos de kársticos (figura 29).

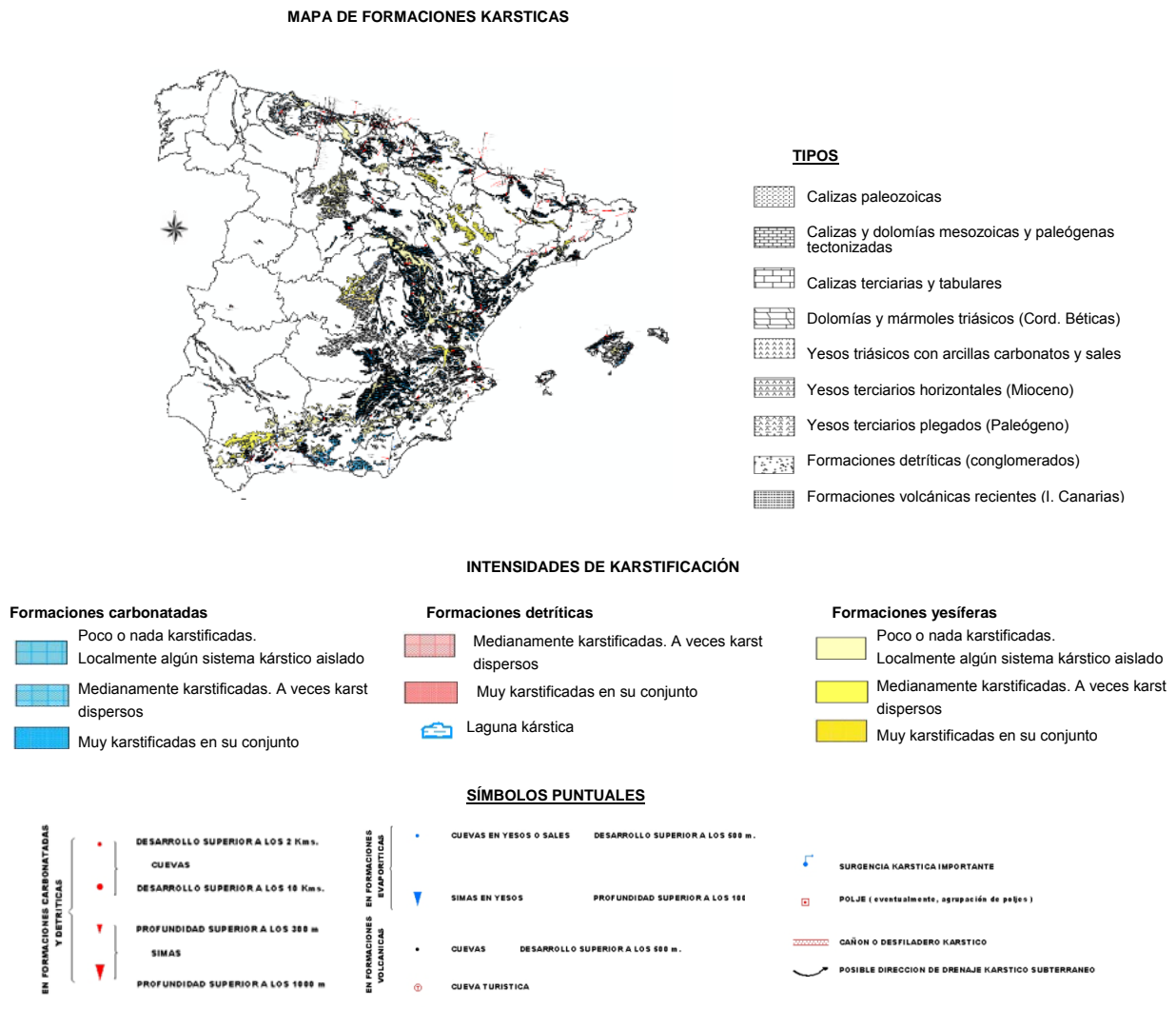


Figura 29: Mapa de formaciones kársticas. Elaboración propia. Fuente: IGME

Igualmente que en el caso de los materiales arcillosos y materiales del cuaternario, no se dispone de datos numéricos, por lo que la metodología de trabajo es la misma que en esos casos: Se realizó el mapa de probabilidad de formaciones kársticas y a partir de la capa vectorial la comparativa de concentraciones de ²²²Rn sobre materiales kársticos y no kársticos (figura 30).

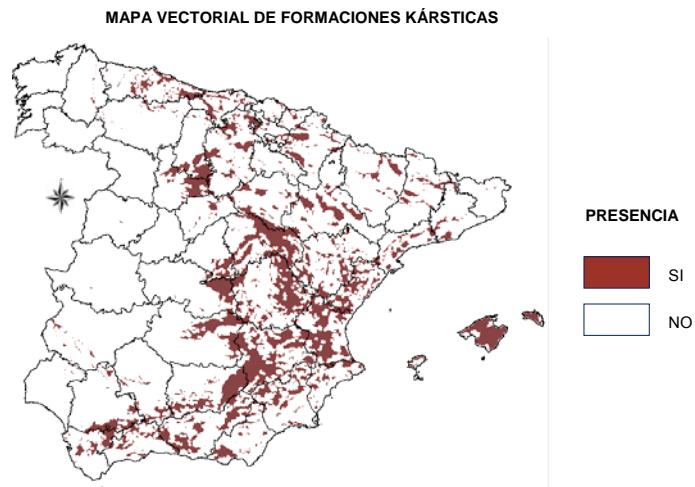


Figura 30: Mapa vectorial de presencia de formaciones kársticas.

2.8

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS A ESCALA 1:200,000

Se empleó el mapa litoestratigráfico de España a escala 1:200,000 del IGME (IGME, 2014a), el cual representa las unidades cartográficas según criterios litoestratigráficos e hidrogeológicos. Una unidad litoestratigráfica es un conjunto de estratos de la sucesión estratigráfica caracterizados por su litología. Formalmente, según su rango, se ordenan en grupos, formaciones, miembros y capas geológicas.

El criterio principal del IGME para su representación gráfica fue cartografiar las unidades con desarrollo litoestratigráfico significativo (tanto por su representación como por su singularidad), incorporando además las unidades que ofrecían un alto interés hidrogeológico por su propia naturaleza litológica (alta permeabilidad), o porque se consideraban parte esencial de la definición de acuíferos.

Los contactos representados entre las unidades fueron de tipo normal, discordante e intrusivo, representándose también las fallas, cabalgamientos y estructuras de plegamiento. El IGME señala que en este mapa litoestratigráfico existen zonas con una densidad de información cartográfica mayor que otras, debido a que para su elaboración se emplearon otros mapas de síntesis realizados con criterios más generales, o bien porque para su confección se utilizaron cartografías de diferente escala. Igualmente se indica que este mapa es la base de los mapas de permeabilidad e hidrogeológico de España a escala 1:200,000.

El IGME ofrece estas unidades litoestratigráficas en formato vectorial, representadas mediante polígonos, asociando en su base de datos a cada unidad unas características específicas a partir de las cuales se ha realizado el análisis de esta variable. Así se analizaron las litoestratigrafías según su origen, permeabilidad y tipología litoestratigráfica. A continuación se describen los métodos empleados en cada uno de estos criterios.

2.8.1 ESTUDIO SEGÚN EL ORIGEN PETROLÓGICO DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

La siguiente figura 31 muestra el proceso de trabajo para el análisis de las unidades litoestratigráficas según su origen:

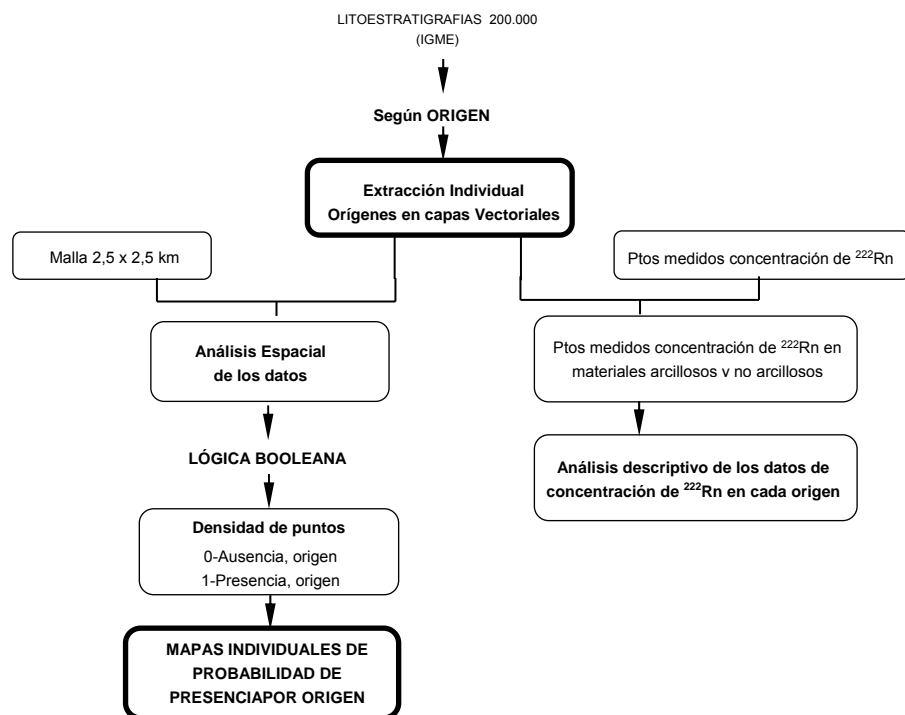


Figura 31: Metodología de trabajo de la variable origen de las unidades litoestratigráficas.

A partir de la base de datos se extrajeron de manera individualizada las capas de tipo vectorial que agrupaban las diferentes unidades litoestratigráficas en siete tipos de orígenes: carbonatado, detrítico, detrítico del cuaternario, evaporítico, ígneo, meta detrítico y volcánico (figuras 32 y 33).

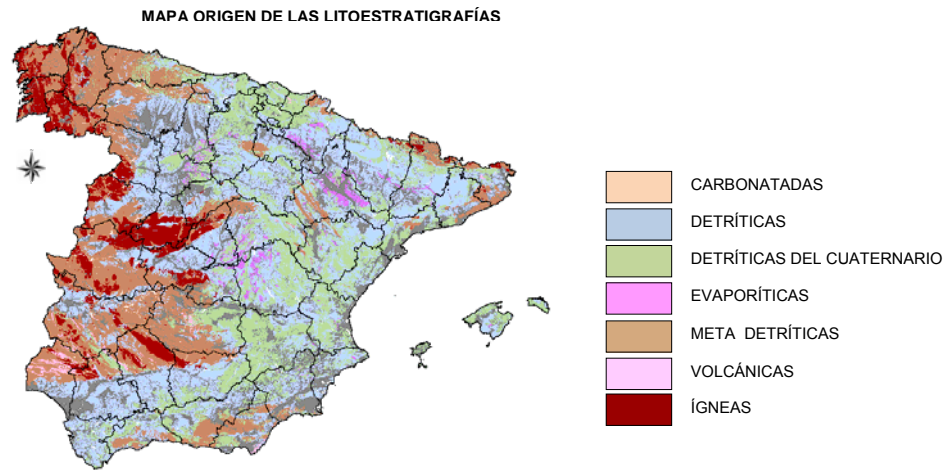
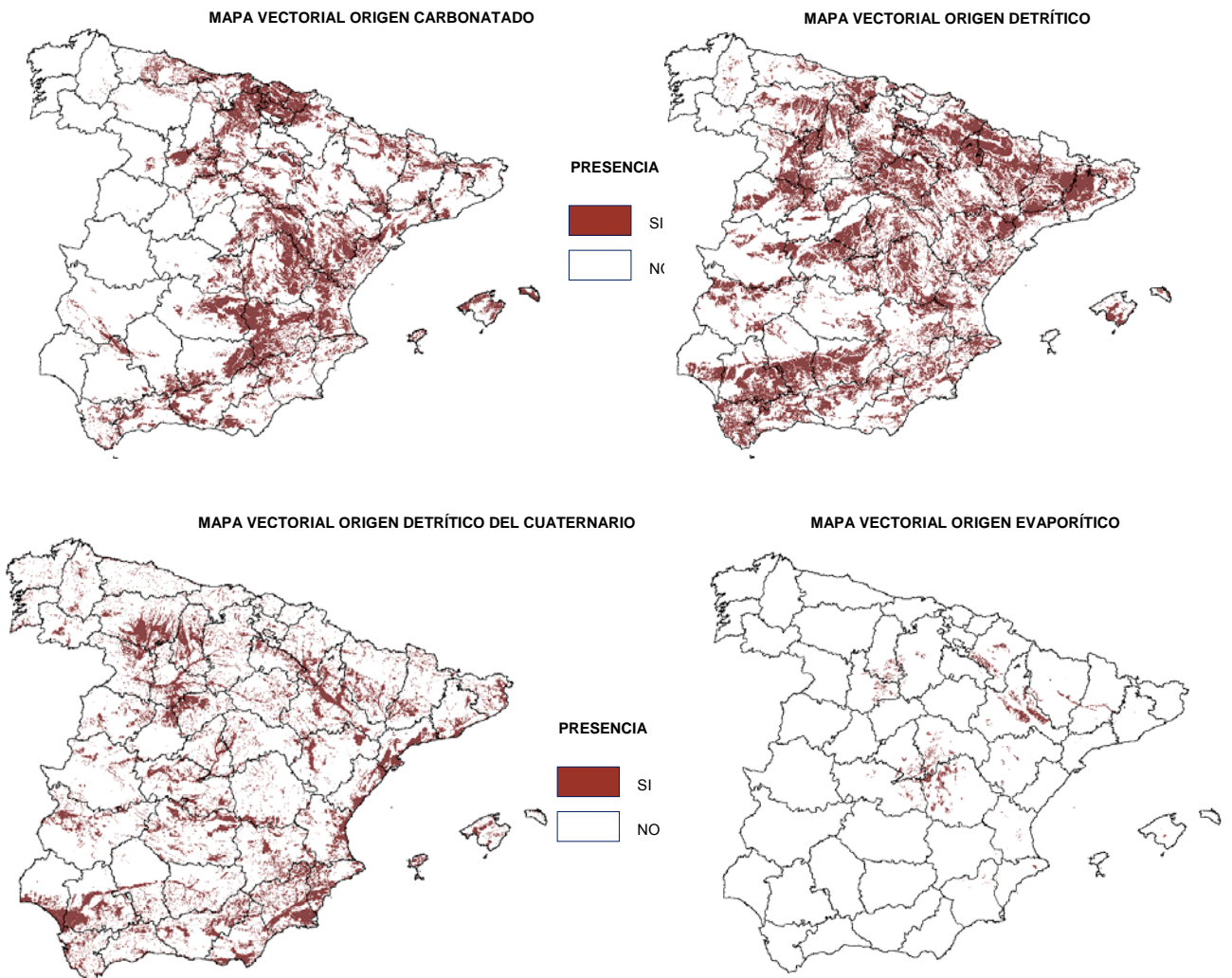


Figura 32: Mapa origen de las unidades litoestratigráficas. Elaboración propia. Fuente: IGME.



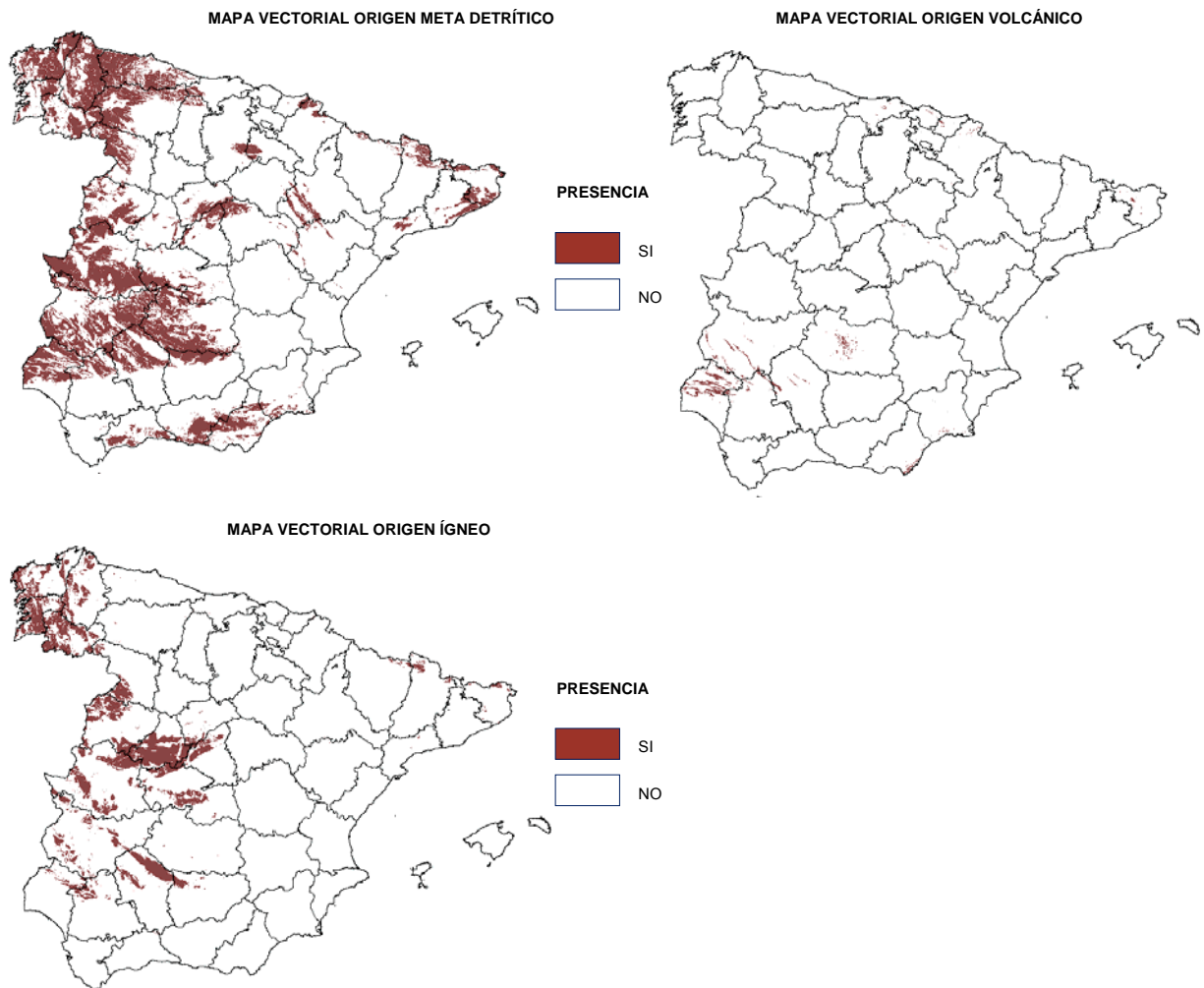


Figura 33: Mapas vectoriales de presencia/ausencia de los diferentes orígenes de las unidades litoestratigráficas.

Para cada una de estas últimas 7 capas se realizaron dos tipos de operaciones: se interseccionaron con los puntos medidos de concentración de ^{222}Rn para realizar un análisis descriptivo de los datos, y se interseccionaron con la malla de puntos de 2,5 x 2,5 km² para obtener los diferentes mapas de probabilidad por tipo de origen.

2.8.2 ESTUDIO SEGÚN LA PERMEABILIDAD DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Las operaciones realizadas con las permeabilidades se basaron en el estudio global e individualizado de los datos proporcionados por el IGME. La base de datos asigna a cada tipo de litoestratigrafía una categoría de permeabilidad (muy alta, alta, media, baja y muy baja), sin ofrecer ningún dato numérico (figura 34).

Los datos de permeabilidad se encuentran asignados a cada unidad litoestratigráfica, por lo tanto reflejan los valores de permeabilidad de las litoestratigrafías o roca madre en relación con su dominio hidrogeológico. Estos datos proporcionados por el IGME no reflejan el dato de permeabilidad de los primeros metros de suelo (substrato superficial), que son los que mayor relevancia tienen en cuanto a la explicación de la presencia de radón.

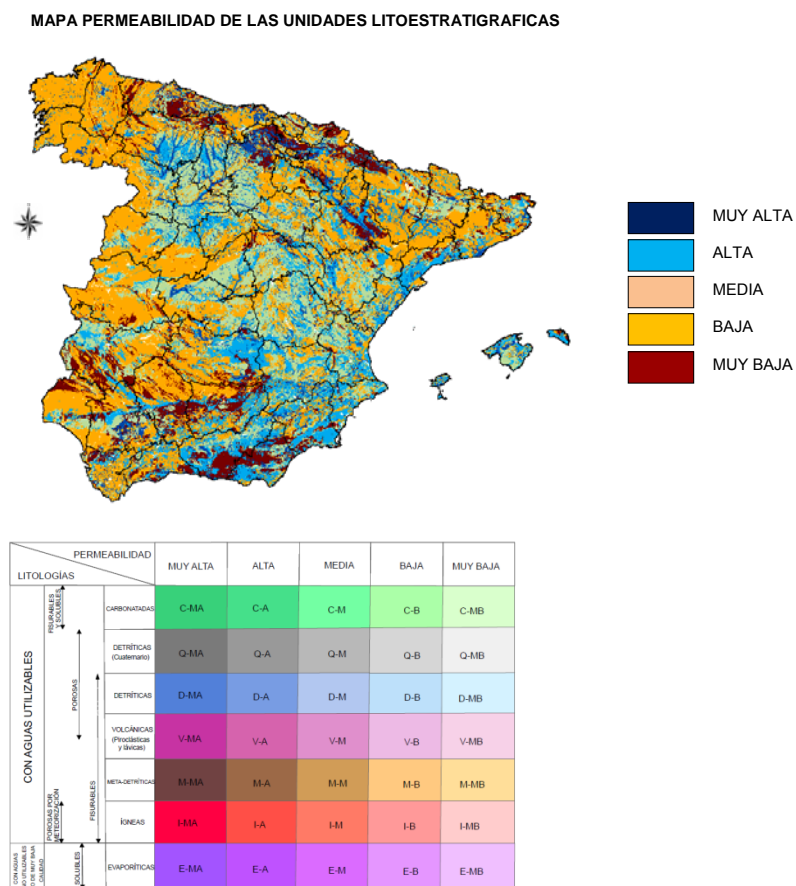


Figura 34: Mapa de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas. Elaboración propia. Fuente IGME.

Por ello fue necesario asignar valores cuantitativos a cada una de las permeabilidades, otorgando los valores más elevados a las permeabilidades muy altas (valor 5) y disminuyendo el valor hasta las permeabilidades muy bajas (valor 1).

Con esta variable se operó de tres maneras diferentes: se realizó un análisis descriptivo de los datos de las diferentes permeabilidades a partir de la intersección con los puntos obtenidos de concentración de ^{222}Rn . Además, se obtuvieron mapas de probabilidad de presencia individuales para cada tipo de permeabilidad y un mapa de interpolación de permeabilidades. La metodología de trabajo se muestra en la siguiente figura 35.

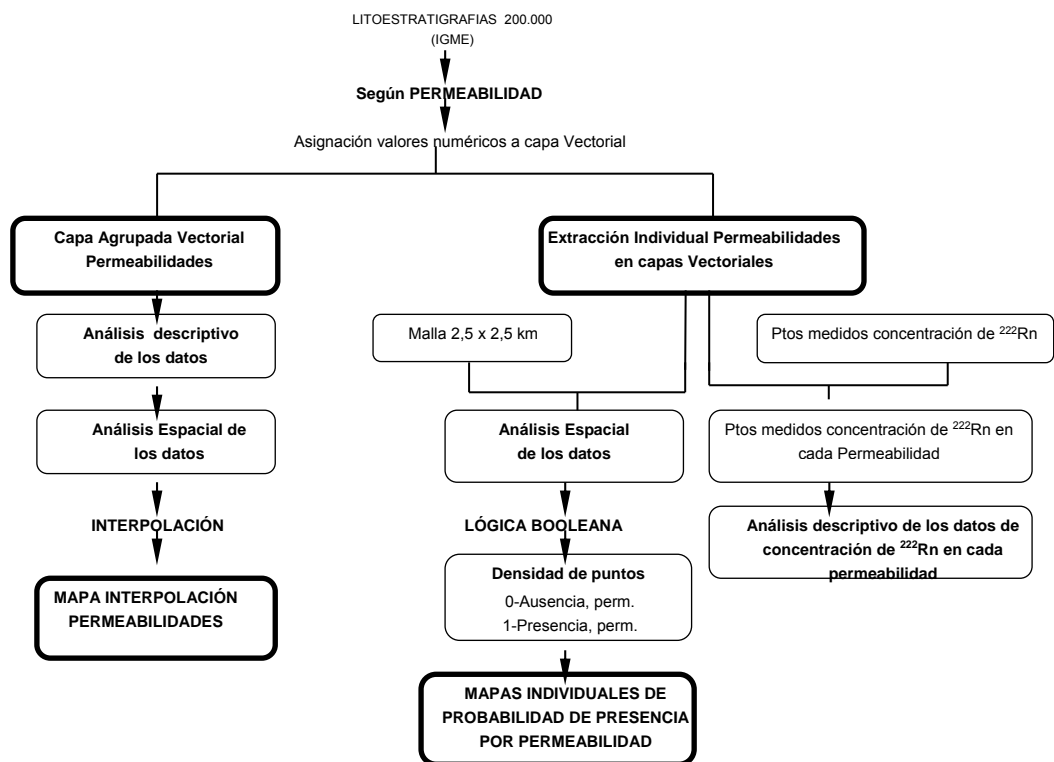


Figura 35: Metodología de trabajo para la variable permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

Para realizar el estudio individualizado de cada una de las permeabilidades se procedió a extraer de la base de datos de manera individual las capas de tipo vectorial que agrupaban las diferentes unidades litoestratigráficas en estos cinco tipos de categorías (figura 36).

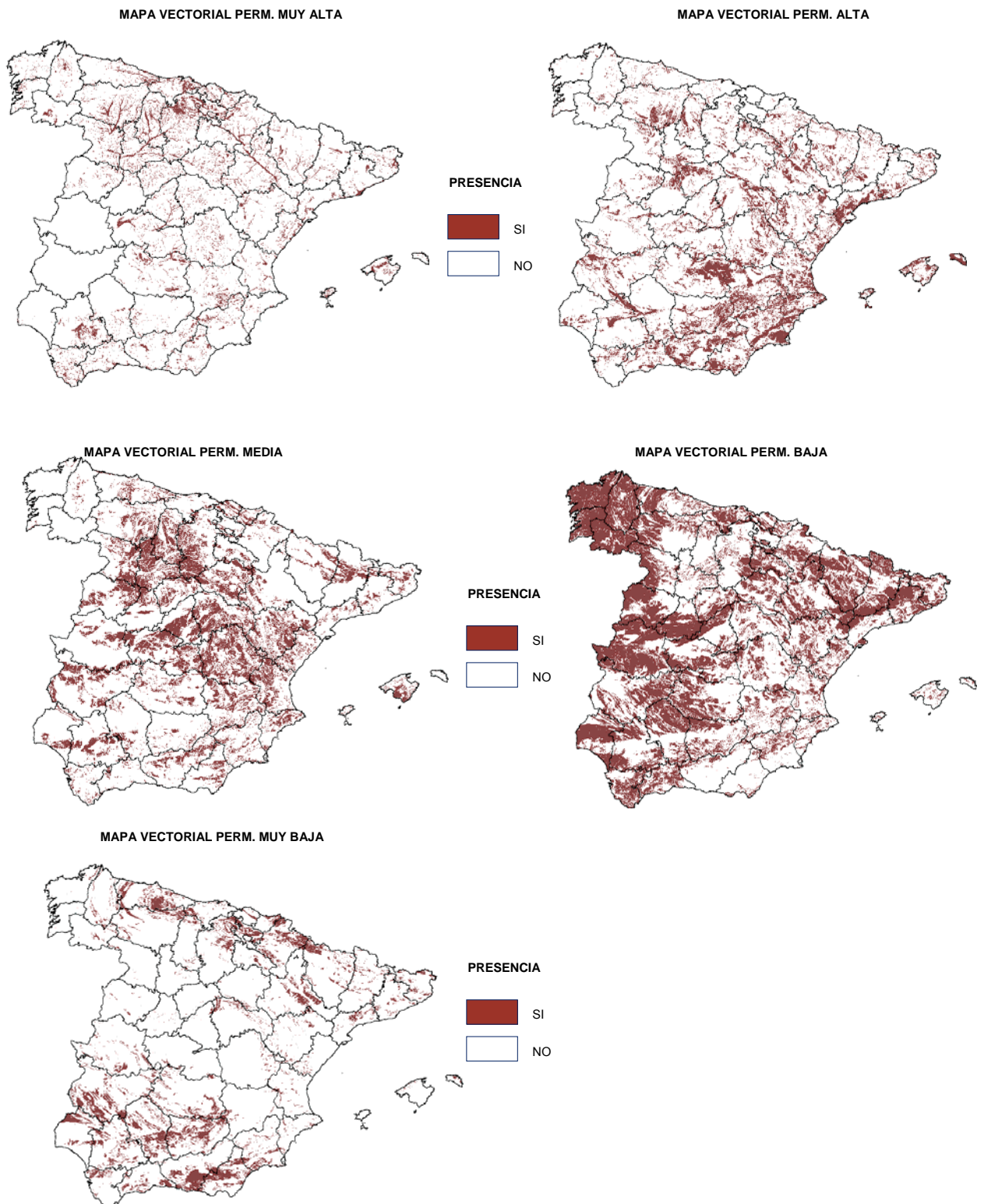


Figura 36: Mapas vectoriales de presencia de cada tipo de permeabilidad.

2.8.3 ESTUDIO SEGÚN EL TIPO DE UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA

Las operaciones realizadas con los 330 tipos de unidades litoestratigráficas existentes en la península se basaron en el análisis individualizado a partir de los datos ofrecidos por el IGME. (Figura 37).

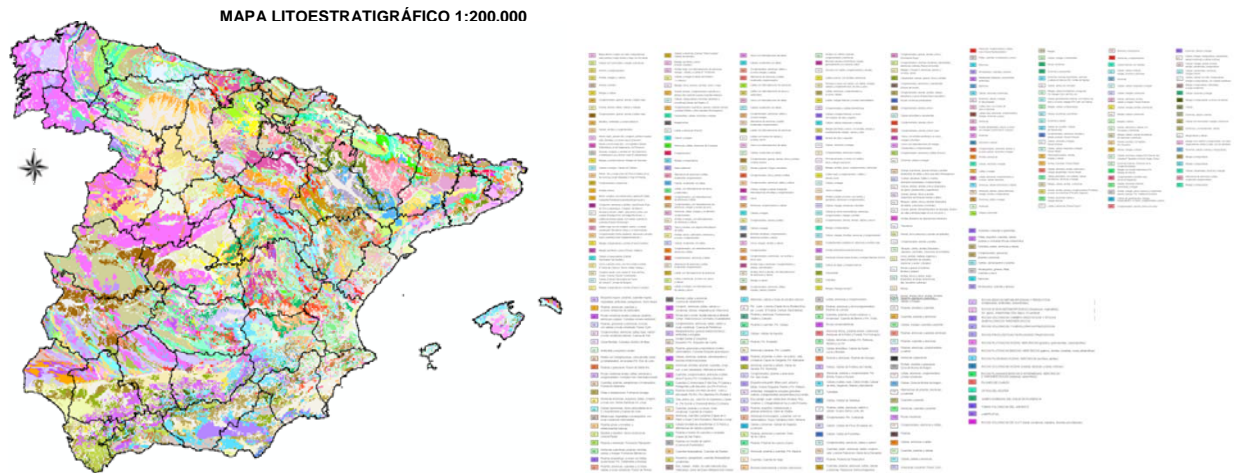


Figura 37: Mapa Litoestratigráfico de España 1:200.000. Elaboración propia. Fuente: IGME.

En la figura 38 se observa la complejidad de la metodología empleada en el análisis de las diferentes tipologías litoestratigráficas, a partir del estudio realizado por parte del CSN ([García et al., 2013b](#)), en el que se delimitaban una serie de zonas potenciales a presentar concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m^3 , además de realizarse un estudio completo de estas 330 unidades litoestratigráficas para así identificar las que presentasen una vinculación positiva con el radón.

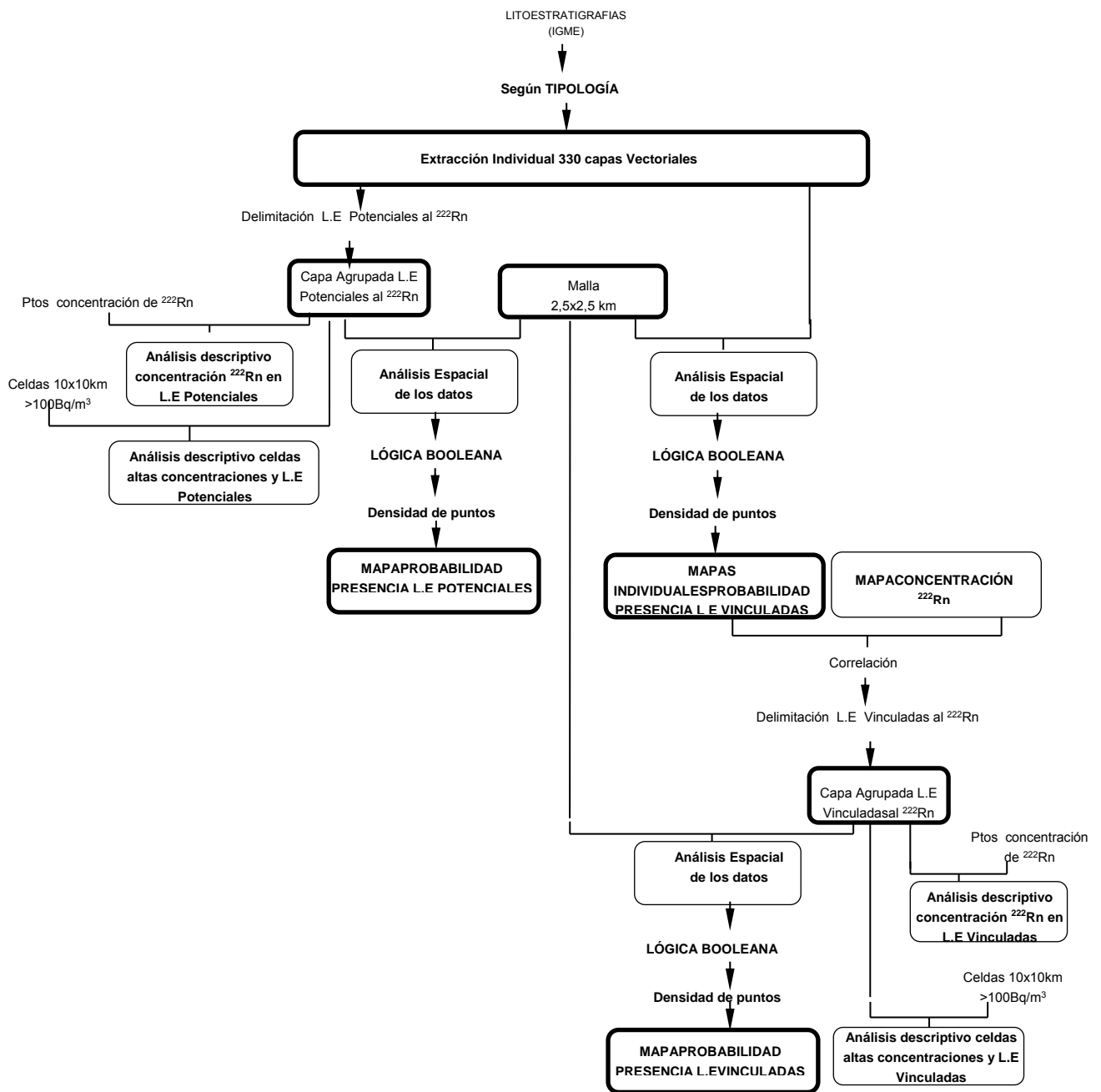
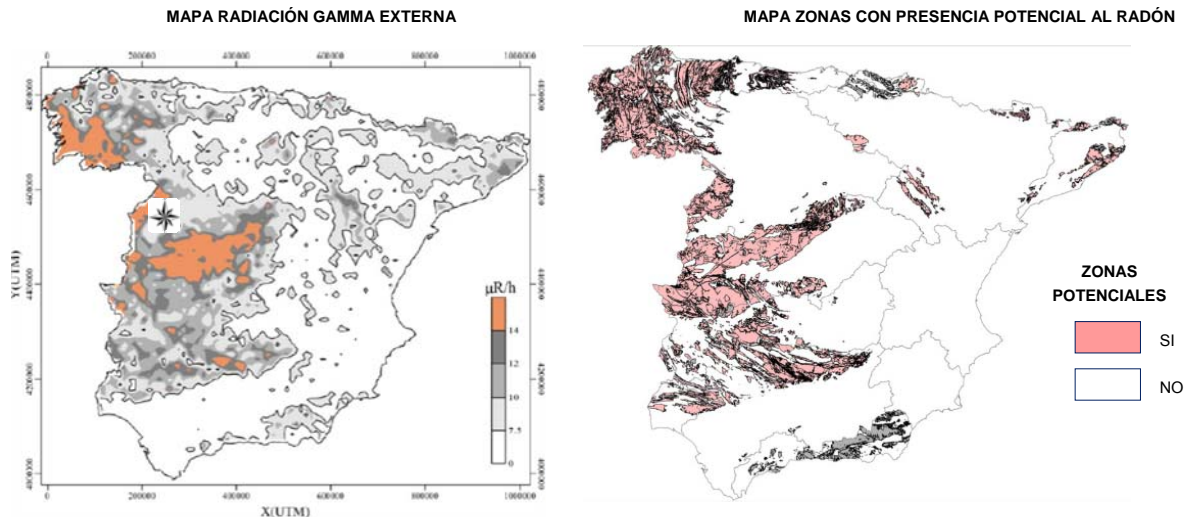


Figura 38: Metodología de trabajo de la variable tipología de las unidades litoestratigráficas.

1. LITOESTRATIGRAFÍAS CON PRESENCIA POTENCIAL AL RADÓN

Como se ha citado anteriormente, se analizó el estudio realizado por parte del CSN (García et al., 2013b), en el que se delimitaban una serie de zonas potenciales a presentar concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m³, basándose en la utilización de los datos de concentración de radón en los interiores de viviendas junto

con datos obtenidos del mapa de radiación gamma natural (figura 39) y datos de mapas geológicos del IGME como el litoestratigráfico o el metalogénico, ambos a escala 1:200,000. Esta delimitación litoestratigráfica es la que se observa en la figura 40.



Figuras 39 y 40: Mapa de radiación gamma externa y mapa de zonas con presencia potencial al radón. Fuente: (García et al., 2013b)

El estudio delimitaba en España zonas con presencia potencial al radón (Radon Prone Areas) vinculadas a una serie de unidades litoestratigráficas. Se seleccionaron en la base de datos las litoestratigrafías de interés y se generaron capas vectoriales individualizadas para cada una de ellas.

Mediante la intersección con la capa de puntos de las medidas de concentración de ^{222}Rn se analizaron los datos de concentración obtenidos para esas litoestratigrafías señaladas. Para poder trabajar con el resto de las variables del presente estudio se decidió agrupar estas litoestratigrafías en una única capa vectorial de información. Así, mediante la intersección de la malla de $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ se creó el mapa de probabilidad de encontrar una unidad litoestratigráfica con presencia potencial al radón.

Para comprobar que estas unidades de roca eran potenciales a producir altas concentraciones de radón, a modo de validación, se realizó el análisis de celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$ del mapa de concentración de ^{222}Rn que presentaban concentraciones superiores

a los 100 Bq/m³, de este modo se realizó un análisis descriptivo de las celdas con altas concentraciones y su relación con estas unidades litoestratigráficas señaladas.

2. UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS VINCULADAS CON EL RADÓN

Para realizar un análisis completo de los 330 tipos de unidades litoestratigráficas se generaron capas vectoriales individualizadas para cada una de ellas y se les asignó en la base de datos un campo con valor 1, con significado de presencia de la tipología. La intersección con la malla de puntos de 2,5 x 2,5 km permitió realizar diferentes operaciones: en un primer paso se realizaron 330 Mapas de probabilidad de densidad de unidades litoestratigráficas. De este modo para cada píxel de 10x10km se obtuvo una probabilidad de presencia de cada tipo de roca (figura 41).

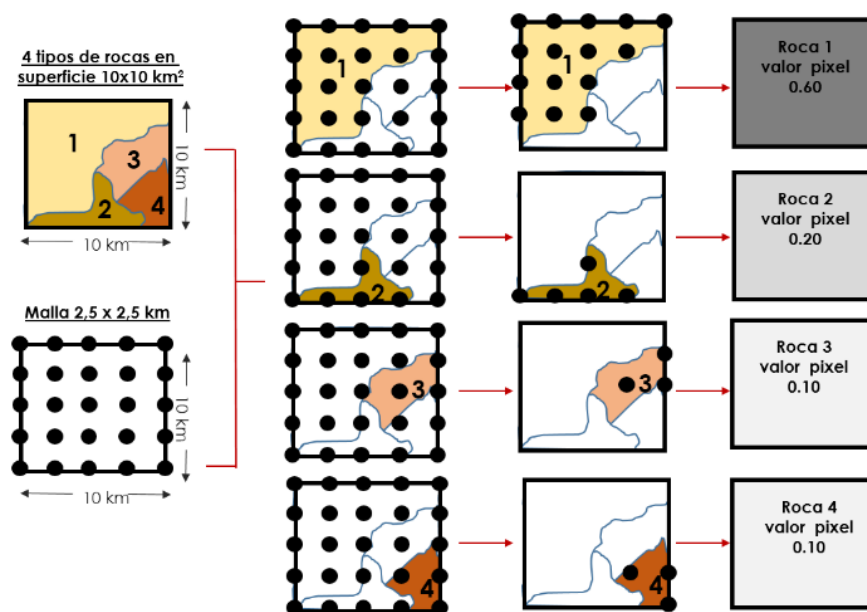


Figura 41: Determinación de probabilidad de presencia de un tipo de unidad de roca (estratigráfica) en un tamaño de píxel de 10x10km.

Al cruzar cada uno de estos mapas con el mapa de interpolación de concentración de ²²²Rn se obtuvo una ecuación del tipo $y = a \pm b$ junto con un coeficiente de correlación R. Se seleccionaron las litoestratigrafías que presentaban una relación $R \geq 0$ con el ²²²Rn (figura 42).

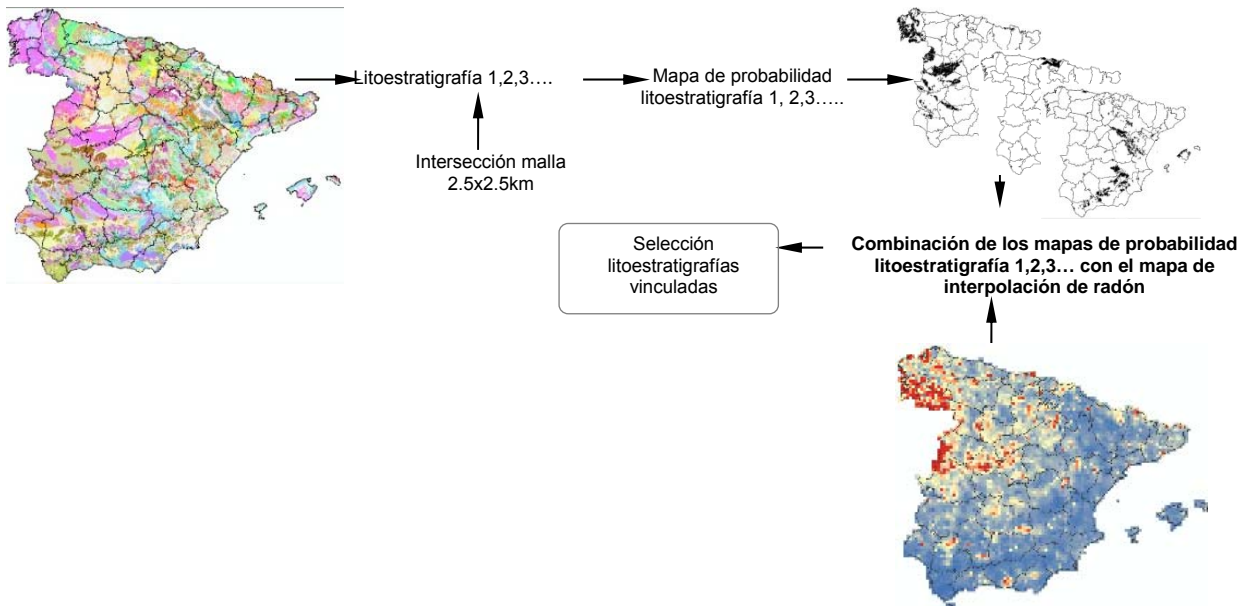


Figura 42: Proceso de trabajo para la selección de las unidades litoestratigráficas vinculadas con el radón.

A partir de este punto se tomaron varias vías de estudio:

La primera fue agrupar las capas vectoriales para realizar el mapa de probabilidad de las litoestratigrafías vinculadas con el ^{222}Rn mediante la intersección con la malla de puntos de 2,5 x 2,5 km. Para comprobar su relación con altas concentraciones de radón, se combinaron con las celdas de más de 100 Bq/m³ del mapa de concentración de radón.

La segunda vía fue trabajar con las capas vectoriales individuales de cada tipo de roca para realizar un análisis de los datos de concentración de ^{222}Rn de cada una de ellas. Finalmente para identificar las litoestratigrafías de interés se siguieron las siguientes pautas: se aceptaron como válidas todas las litoestratigrafías identificadas en el estudio realizado por parte del CSN (García et al., 2013b), en el que se delimitaban una serie de zonas potenciales a presentar concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m³ y se seleccionaron las litoestratigrafías vinculadas con el radón que en el estudio estadístico presentaban concentraciones superiores a los 100 Bq/m³.

2.9

UNIDADES GEOLÓGICAS A ESCALA 1:1,000,000

El análisis de las unidades geológicas tomó como base la cartografía a escala 1:1,000,000 del proyecto One Geology (IGME, 2014b). Este proyecto forma parte de una iniciativa internacional llevada a cabo por diversas organizaciones globales, y tiene como objetivo la creación de mapas digitales geológicos dinámicos del mundo a escala 1:1,000,000, con criterios similares, para que puedan ser utilizados internacionalmente. Se generó ante la necesidad de dar calidad y coherencia a unos mapas que en muchas ocasiones presentan una gran diversidad de datos. El objetivo del proyecto es recopilar, hacer accesibles y crear mapas digitales geológicos a escala global, unificando los criterios geológicos.

Se incluyen tres capas de información que representan polígonos vectoriales con información de las Unidades del sustrato-formaciones superficiales, de las Unidades Litológicas y de las Edades Geológicas. Cada capa asocia en su base de datos unas características para cada tipo de roca a partir de las cuales se ha realizado el estudio de las tipologías litológicas, edades y unidades superficiales.

2.9.1 ESTUDIO SEGÚN TIPOLOGÍA LITOLÓGICA

En la península ibérica aparecen 25 tipos de tipologías litológicas (figura 43).

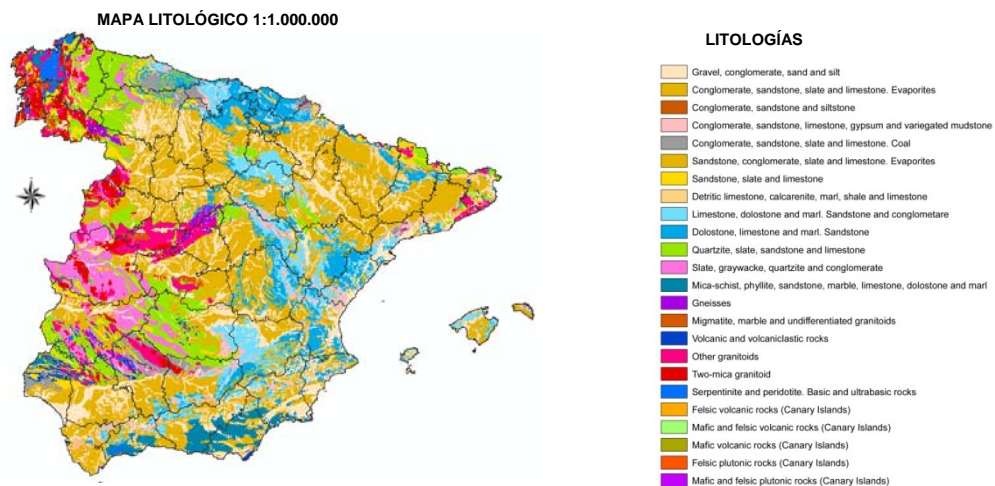


Figura 43: Mapa Litológico de España 1:1,000,000. Elaboración propia. Fuente: IGME.

El análisis de estos 25 tipos de litologías se realizó a partir de la generación de capas vectoriales individualizadas para cada una de las unidades litológicas, a las que se les asignó un campo con valor 1 para denotarla presencia de la unidad.

La intersección con la malla de puntos de 2.5 x 2.5 km permitió realizar 25 mapas de probabilidad de litologías que correlacionados de forma individual con el mapa de interpolación de concentración de ^{222}Rn permitió identificar las litologías relacionadas. Estas capas vectoriales al ser intersectadas con los datos de concentración de radón fueron la base para realizar un análisis preliminar descriptivo de los datos de concentración de ^{222}Rn para estas litologías.

Agrupando estas capas en una única capa de información, a partir de la intersección con la malla de 2.5 x 2.5 km, se obtuvo el mapa de probabilidad de presencia de una litología vinculadas con el radón. Para comprobar este último valor se solapó esta capa con las celdas de 10 x 10 km² que presentaban más de 100 Bq/m³. La metodología de trabajo para esta variable es la que se muestra en la figura 53.

2.9.2 ESTUDIO SEGÚN LAS EDADES GEOLÓGICAS DE LOS MATERIALES

Se analizaron las 28 edades geológicas que se han definido en el mapa 1:1,000,000 del IGME para España (figura 44), utilizando el mismo procedimiento explicado anteriormente para la litología.

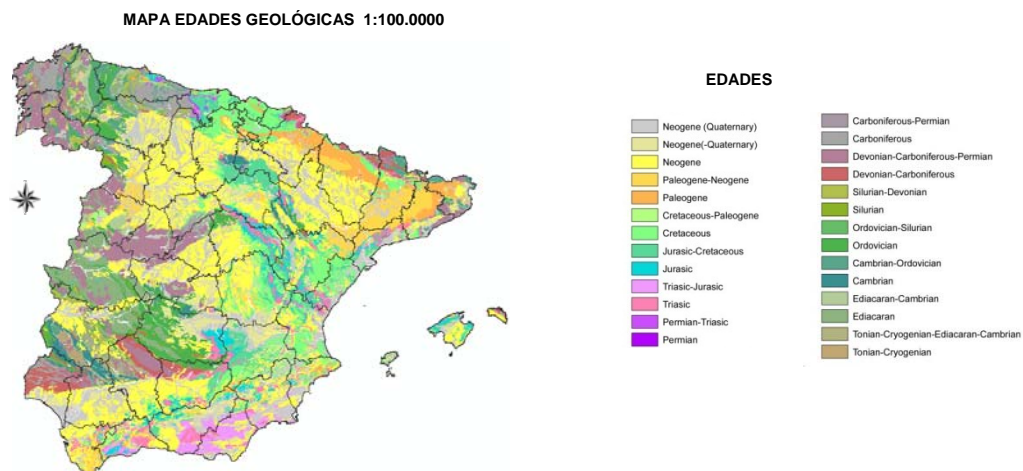


Figura 44: Mapa Edades Geológicas de España 1:1,000,000. Elaboración propia. Fuente: IGME.

Se obtuvieron las edades vinculadas con el radón a partir de las cuales se realizó: un análisis descriptivo de los datos de concentración, el análisis descriptivo asociado a las celdas con mayores concentraciones y el mapa de probabilidad de presencia de estas edades.

2.9.3 ESTUDIO SEGÚN LAS FORMACIONES SUPERFICIALES Y DEL SUBSTRATO

La metodología de análisis para las 129 unidades definidas en la península (figura 45) es la misma que en los casos anteriores: se seleccionaron las unidades vinculadas con el radón a partir de las cuales se realizó un análisis descriptivo de los datos de concentración de radón, el mapa de probabilidad de presencia, y el análisis descriptivo de la vinculación de éstas mediante el solape de las celdas de más de 100 Bq/m³.

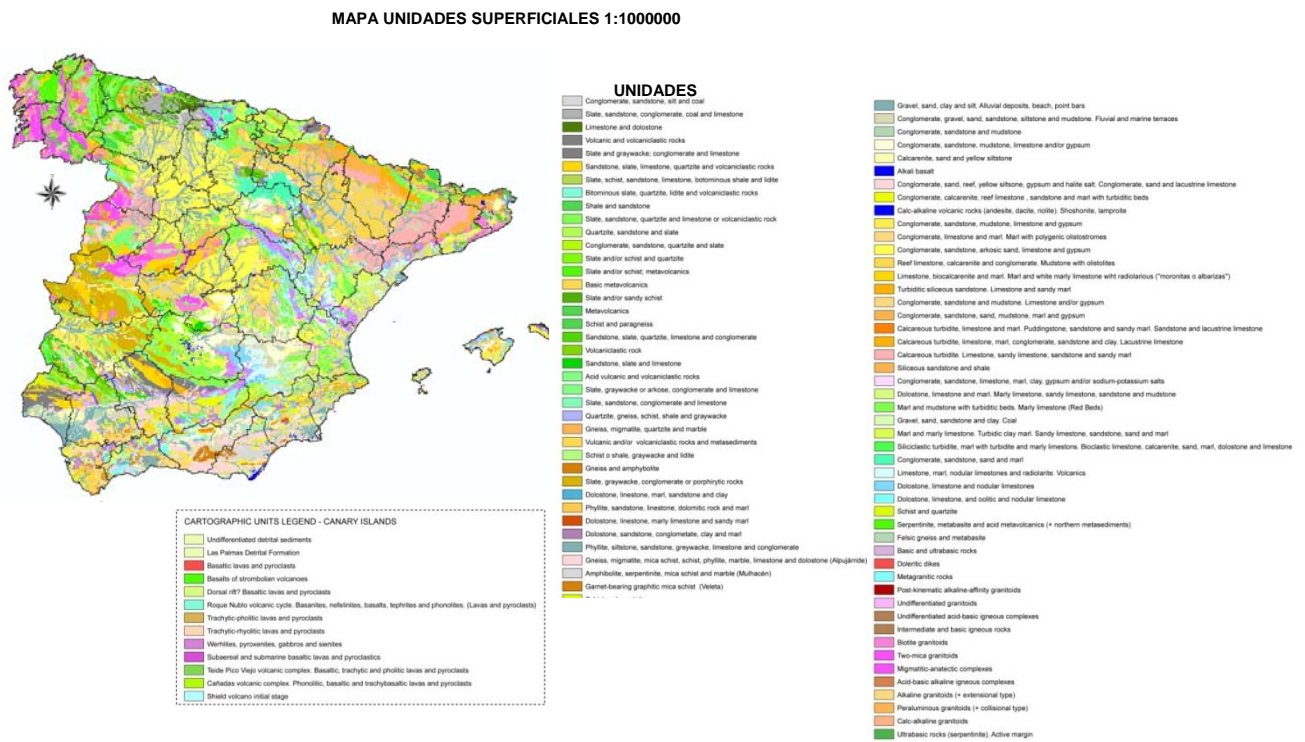


Figura 45: Mapa de España 1:1,000,000 de Unidades litológicas del sustrato y de las formaciones superficiales. Elaboración Propia. Fuente: IGME.

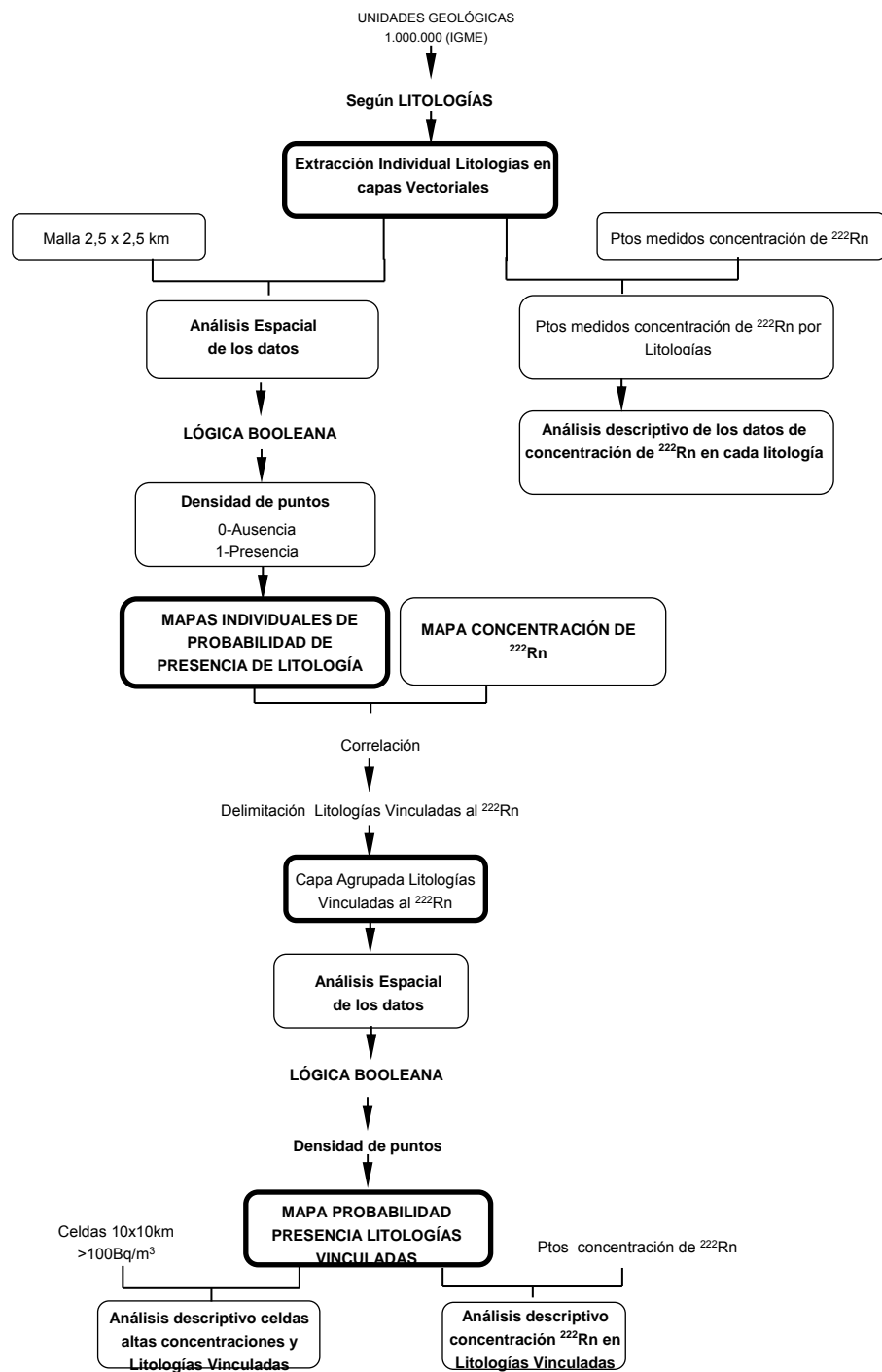
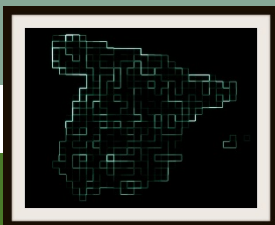
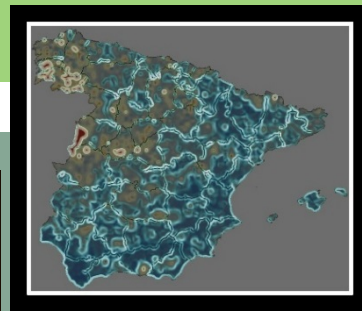


Figura 46: Metodología de trabajo para la variable Tipología Litológica

RESULTADOS



3

RESULTADOS

1

**CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn EN AIRE:
SISTEMA EUROPEO DE CELDAS 10 x 10 Km²
MAPA ESPAÑOL DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn** **1.1 MAPA DE MEDIDAS DIRECTAS DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn**

La información de las medidas de concentración de radón se almacenó en la base de datos del GIS a través de unos campos que recogían datos sobre el identificador de cada celda 10x10 km², las coordenadas “x” e “y” de su centroide, el número de medidas previstas, el número de medidas realizadas y la estadística que fue referenciada a ese centroide. Los campos estadísticos analizados para las medidas realizadas en cada celda 10x10 km² fueron la mediana, mínimo, máximo, media aritmética, media geométrica y sus desviaciones estándar.

El principal objetivo fue representar la concentración de radón residencial en una superficie de celda de 10x10 km² para visualizar las zonas geográficas de España según concentraciones.

El primer paso fue definir las categorías de concentración: La Organización Mundial de la Salud ([WHO, 2009](#)), la Comisión Internacional de Protección Radiológica ([ICRP, 2009, 2014](#)) y el Consejo de Seguridad Nuclear ([CSN, 2012a](#)), establecen los niveles de referencia en el rango de 100 y 300 Bq / m³. Por ello en cumplimiento de las recomendaciones de estos organismos, la clasificación se llevó a cabo estableciendo cuatro categorías de concentración: <50 Bq / m³; 50-100 Bq / m³; 100-300 Bq / m³ y > 300 Bq / m³. Pese a que se podían haber clasificado las concentraciones en tres categorías (<100 Bq / m³; 100-300 Bq / m³, >300 Bq / m³), se tomó la decisión de incluir un rango inferior a los 100 Bq / m³ para identificar las zonas con menores concentraciones.

El segundo paso fue definir el campo a representar: La representación de los datos varía al aplicar la media geométrica o la media aritmética, por eso fue necesario definir cuál de las dos variables era la más adecuada. Se parte de la base de que las

medidas realizadas en Europa para la consecución del Mapa Europeo del Radón utilizan la media aritmética para representar los datos obtenidos.

Las tablas 1, 2 y 3 resumen la estadística global de los datos a lo largo de las diferentes campañas de muestreo. Como se observa, en comparación con las campañas de medidas anteriores (CSN, 1998; Martín Matarranz, J.L., 2004. García et al, 2013a. Sainz et al, 2014), tanto la media geométrica como la media aritmética nacional se han incrementado. Esto se debe al hecho de que en la segunda fase del proyecto, la atención se centró en las áreas que se esperaba tener una alta exposición al radón.

Concentración					Nº de medidas por celda			Estadística	
Bq/m3	M.A		M.G		Nº Medidas	Nº Celdas	%	M.A	Ds M.A
	Nº Celdas	%	Nº Celdas	%					
< 50	1133	45	1217	49	1	1365	55	80.3	93.7
50-100	811	32	794	32	2	534	21	52.9	2.5
100-300	509	21	452	18	3	243	10	10-1269	
> 300	49	2	39	1	4	127	5		
					5	71	3		
					>6	162	6		

Tabla 1: Estadística de la primera campaña de muestreo; 5556 datos. Años 2011-2013

Concentración					Nº de medidas por celda			Estadística	
Bq/m3	M.A		M.G		Nº Medidas	Celdas	%	M.A	Ds M.A
	Nº Celdas	%	Nº Celdas	%					
< 50	1446	45	1614	50	1	1586	49	95.0	270.4
50-100	1011	31	969	30	2	633	20	56.6	2.6
100-300	699	22	595	18	3	333	10	10-15403	
> 300	64	2	40	2	4	162	5		
					5	105	3		
					>6	401	13		

Tabla 2: Estadística de la segunda campaña de muestreo; 9211 datos. Años 2013-2014

Concentración					Nº de medidas por celda			Estadística	
Bq/m3	M.A		M.G		Nº Medidas	Nº Celdas	%	M.A	Ds M.A
	Nº Celdas	%	Nº Celdas	%					
< 50	1482	45	1644	50	1	1537	46	100.5	260.5
50-100	1048	31	1036	31	2	635	19	57.0	2.7
100-300	716	22	586	18	3	321	10	10-15403	
> 300	59	2	34	1	4	168	5		
					5	124	4		
					>6	520	16		

Tabla 3: Estadística actual de los datos. 10920 datos. Años 2014-2017

En todo caso, se observa que al emplear la media geométrica, el número de celdas que se encuentran por debajo de los 50 Bq/m³ aumenta un 5% respecto a la utilización de la media aritmética, mientras que en el rango de concentración 100-300 Bq/m³ ve reducido su porcentaje un 4%.

Este hecho planteó la necesidad de utilizar la media aritmética en la representación de los datos puesto que evita el efecto de suavizado de las concentraciones obtenidas por celda. Sobre todo en casos como en el rango 100 – 300 Bq/m³ en el cual cualquier suavizado de los datos puede llevar a interpretaciones erróneas puesto que son los límites recomendados para iniciar o no planes de acción en las viviendas.

Los datos de concentración de ²²²Rn en aire se analizaron a partir de las medidas de tendencia central, dispersión y según la forma de la muestra de la distribución. La siguiente tabla 4 ofrece los principales parámetros obtenidos:

Número de datos: 10920	Moda: 10 Bq/m ³
Mínimo: 10 Bq/m ³ (Límite de detección)	Coefficiente de Asimetría: 31.76
Máximo: 15403 Bq/m ³	Curtosis: 1511.52
Media Aritmética: 100.54 Bq/m ³	1 ^{er} cuartil: 30
Desviación Estándar (M.A): 260.49	3 ^{er} cuartil: 109
Media Geométrica: 57.00 Bq/m ³	Varianza: 67856.61
Desviación Estándar (M.G): 2.72	Coefficiente de Variación: 259.09
Mediana: 56 Bq/m ³	

Tabla 4: Estadística descriptiva de los datos de concentración de ²²²Rn

Las medidas de tendencia central como media, mediana y moda muestran el dato más representativo de la muestra, en este caso se observa que los datos no siguen una distribución normal pues la media aritmética es de 100.54 Bq/m³ y la mediana desciende a 56 Bq/m³.

La homogeneidad de los datos se comprueba a través de las medidas de dispersión: La desviación estándar señala cuánto tienden a alejarse los valores de la media, en el caso de la desviación estándar de la media aritmética es de 260.49 Bq/m³ con lo que muestra una elevada dispersión.

El coeficiente de variación señala la representatividad de la media: si ésta es menor de 100 no existirá un problema con los datos extremos, si el coeficiente oscila entre 100 y 200 los valores extremos de los datos son tolerables, mientras que si se supera el valor 200 existen problemas con estos extremos de los datos (Agua y SIG, 2016). El resultado es un coeficiente de variación de 259.09% con lo que se verifica que los datos de la muestra son muy dispersos, encontrándose los resultados en un rango muy amplio de valores.

El análisis de la forma de la distribución de la muestra da idea del grado de su deformación respecto a la distribución normal. El elevado coeficiente de curtosis ($K=1511.52$) indica una distribución leptocúrtica y el coeficiente de asimetría ($C.S=31.76$) una asimetría positiva.

Pero es la representación gráfica de la distribución la que da una mejor idea del grado de desviación de la distribución de los resultados con respecto a la distribución normal. En la representación se han utilizado gráficos Cuantil-Cuantil, también llamados Q-Q Plot. Esta herramienta se utiliza habitualmente como método gráfico para diagnosticar la desviación entre la distribución real de los datos disponibles, y una determinada distribución de probabilidad teórica.

El gráfico de cuantiles a través de un gráfico QQ Normal muestra como los datos no se aproximan a la recta, por lo que no se distribuyen de forma normal (figura 1)

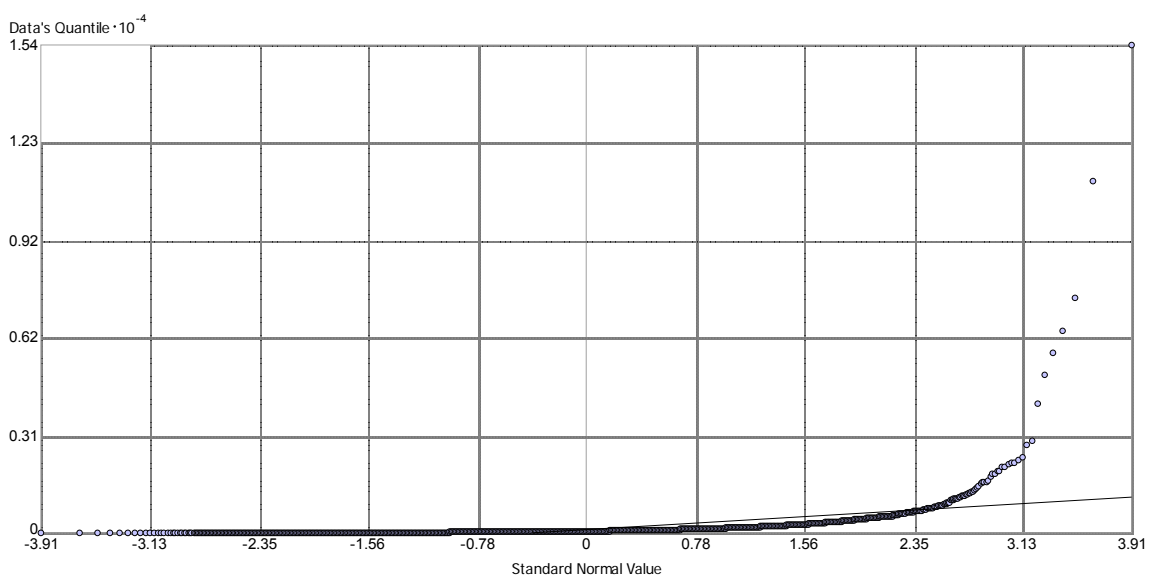


Figura 1: Gráfico QQ plot de los datos de concentración de ^{222}Rn

La distribución de los datos se observa de manera más clara en el siguiente histograma (figura 2)

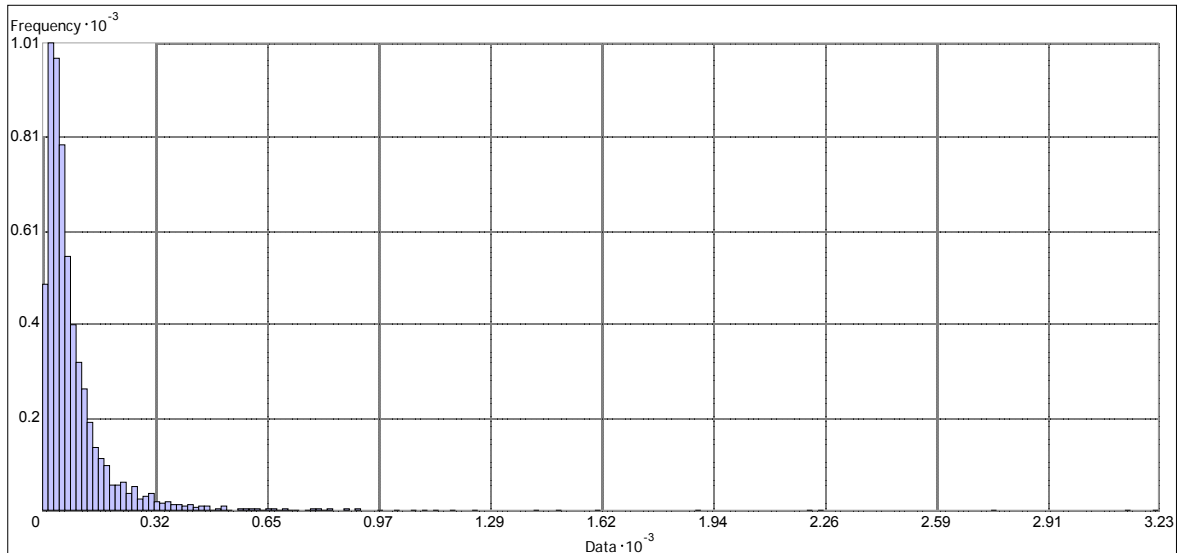


Figura 2: Distribución de los datos de concentración de ^{222}Rn

La distribución de los datos presenta una distribución log normal (es decir, los logaritmos de las concentraciones siguen una distribución normal) distribución habitual en los resultados de medidas de concentración del gas ^{222}Rn , observándose que la mayoría de las mediciones obtenidas se encuentran en concentraciones bajas, mientras que tan solo unas pocas medidas aparecen en el rango de altas concentraciones.

Este tipo de distribución indica que las medidas de concentración tienen una variabilidad entre cero e infinito, con lo que la probabilidad de que una medición se encuentre más o menos alejada de la concentración media depende de la desviación estándar de la distribución (variabilidad de las concentraciones medidas). Este hecho se tuvo en cuenta al realizar el modelo de interpolación de esta variable, pues hay técnicas de interpolación que sólo son válidas para distribuciones normales.

Además, la obtención de los datos no se realizó de forma aleatoria, pues se forzó la obtención de muestras según unos criterios de tipo superficial, poblacional, geológico y de potencial de radón, por lo que es un muestreo estratificado. Este hecho se muestra en la siguiente figura 3 en donde se refleja el número de medidas por celda $10 \times 10 \text{ km}^2$. Como se puede observar, hay zonas de España con una densidad de muestreo

muy superior a otras. La figura ilustra que la mayor parte de España (el 60%) se encuentra cubierta con al menos una medida, pero en un 40% del territorio no se realizó ninguna medición, esto se debe en parte a la dificultad para la realización del muestreo en algunas áreas despobladas o con muy baja densidad de población.

En las sucesivas campañas de muestreo se hizo hincapié en tener al menos 6 mediciones en ciertas áreas de interés, pero a día de hoy tan sólo el 16% del territorio nacional se encuentra cubierto con más de 6 medidas por celda.

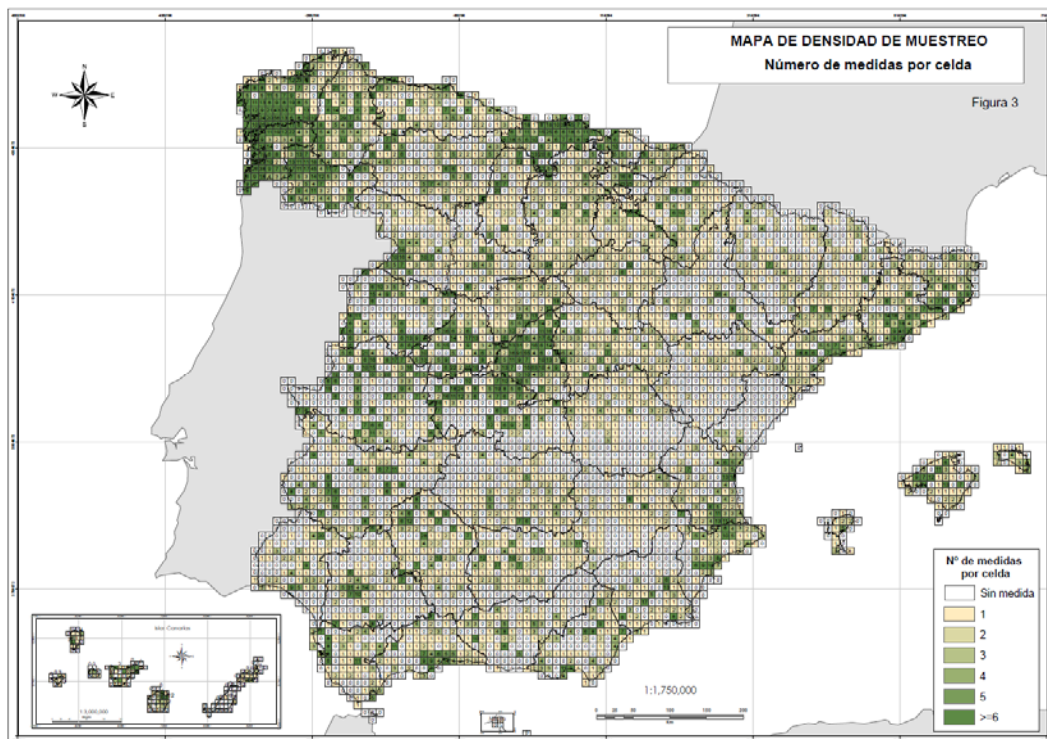


Figura 3: Densidad de muestreo: Número de medidas por celda 10x10 km²

La representación gráfica de los datos de concentración obtenidos en el sistema de celdas 10 x 10 km² es el Mapa español de concentración ²²²Rn de medidas directas (figura 4).

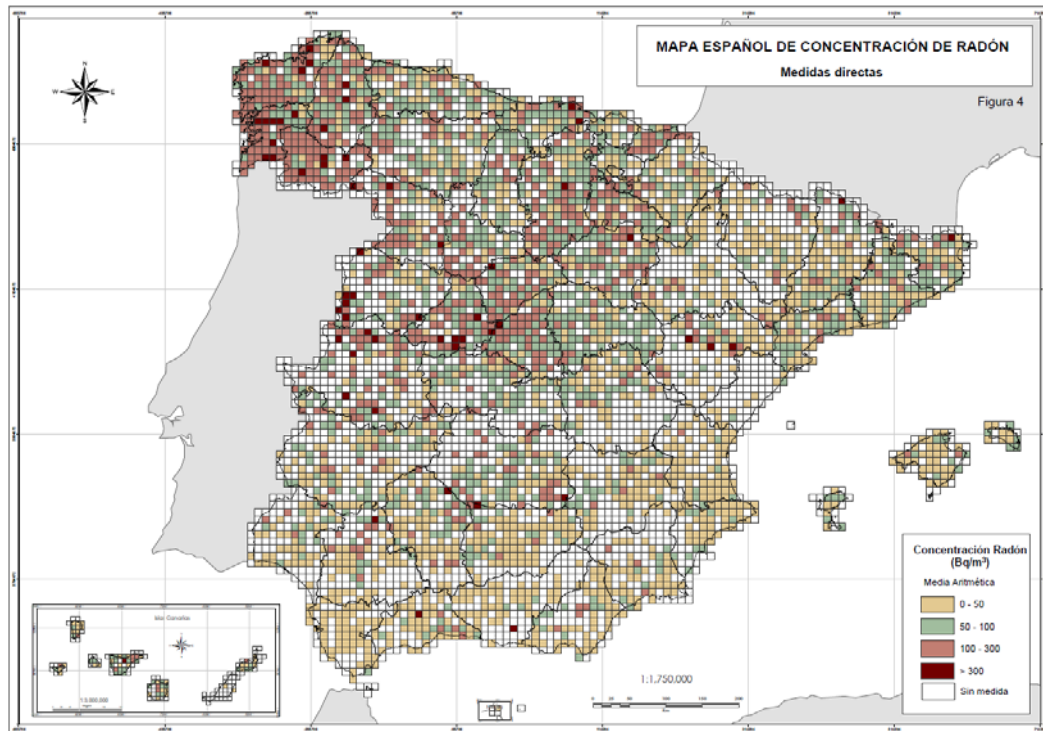


Figura 4: Mapa Español de Concentración ^{222}Rn de medidas directas

Actualmente, el 45% de las celdas analizadas presentan concentraciones inferiores a 50 Bq/m^3 , el 31% de ellas con concentraciones entre los $50\text{-}100 \text{ Bq/m}^3$, un 22 % en el rango entre 100 y 300 Bq/m^3 , y el 2 % restante presenta concentraciones superiores a los 300 Bq/m^3 . Este dato refleja que el 24% de las celdas analizadas supera el límite de los 100 Bq/m^3 recomendados por la OMS como nivel de referencia para iniciar planes de acción.

Al analizar estos datos de concentración por celdas, junto con el número de medidas realizadas en cada una de ellas, (figura 5), se observa numerosas celdas que presentan altas concentraciones coinciden con que tienen escasas medidas. Además también se refleja la problemática de las celdas en las que no se realizó ninguna medición.

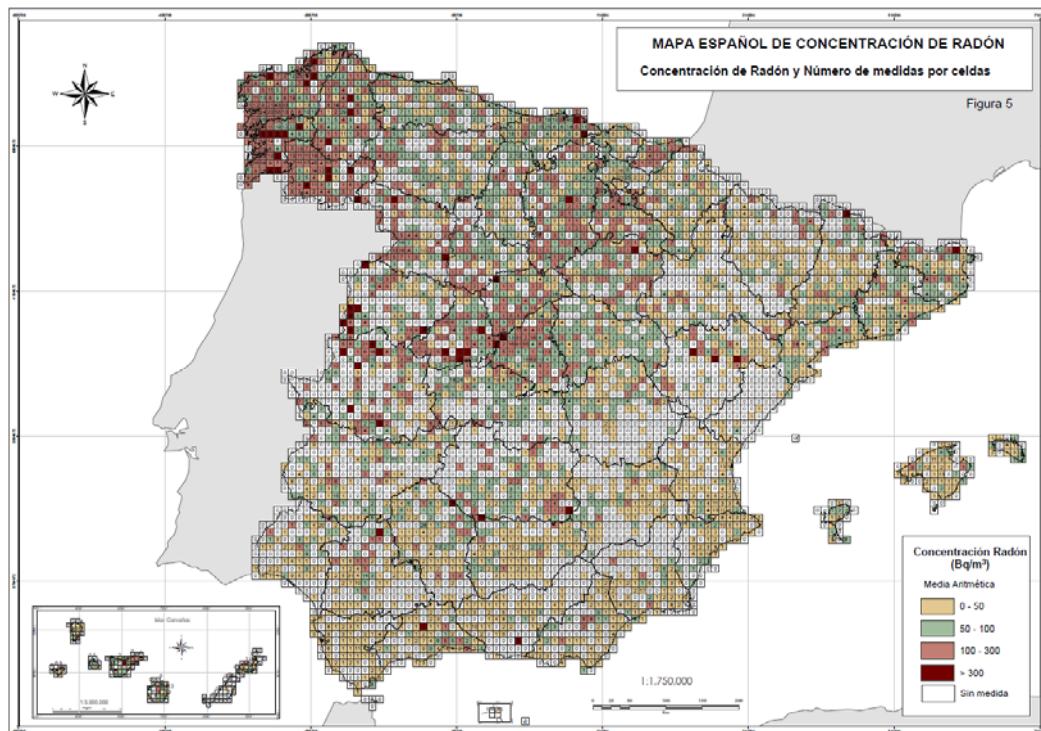


Figura 5: Concentración ^{222}Rn y Número de medidas por celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$

Se comprueba que de manera directa se ha cubierto el 60% de la península con al menos una medida (3234 celdas). Para cubrir el 40% del territorio restante en donde no existe medición (2094 celdas) se realizó una interpolación de los datos.

1.2 MAPA INTERPOLADO DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn

1.2.1 ELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PIXEL Y DEL ESTADÍSTICO REPRESENTATIVO DE LA CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn

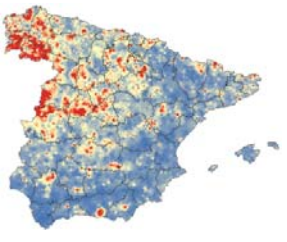
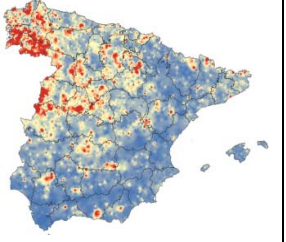
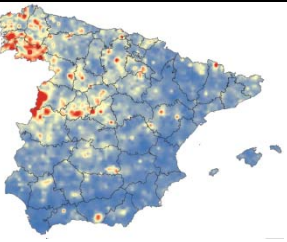
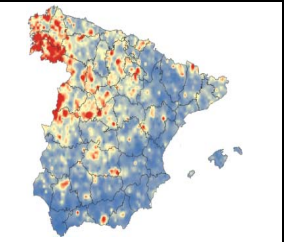
Asociada a la elección del método de interpolación y a las limitaciones de los datos de partida está la elección del tamaño de píxel, pues se tiene que tener en cuenta un aspecto tan importante como cuál es la escala de análisis a la que se quieren representar los resultados en función de los datos disponibles.

Como se ha explicado anteriormente, la Comisión Europea tiene definido un único sistema de referencia para todo Europa (el GISCO-LAEA) y un sistema de celdas de $10 \times 10 \text{ km}^2$ en el que se agregan las medidas realizadas de diferentes proyectos, entre ellos el Atlas Europeo de Radiación Natural (Dubois et al., 2010; Tollefsen et al, 2011, 2014; Boseew et al, 2015 ; de Cort et al, 2011). Para trabajar en un único marco

de trabajo y poder realizar comparativas futuras se realizó la interpolación de las diferentes variables ajustándose a este sistema de celdas para un tamaño de píxel de 10 x 10 km².

La representación de los datos varía al aplicar la media geométrica o la media aritmética como valor indicativo de cada píxel individual, por eso fue necesario definir cuál de los campos era el más adecuado. Se parte de la base de que las medidas realizadas en Europa para la obtención del Mapa Europeo del Radón utilizan la media aritmética para representar los datos obtenidos. Aun así para comprobar que esta escala se ajusta adecuadamente a la muestra, y para poder elaborar mapas de forma fiable, se realizó un análisis comparativo entre diferentes tamaños de píxeles: 1 x1 km, 10 x 10 km, 20 x 20 km, 50 x 50 km y 100 x 100 km. Esta comparativa se realizó a partir de la media geométrica y la media aritmética, a través del método de interpolación basado en la ponderación inversa a la distancia (IDW). De este modo se decidió cuál de los dos parámetros a modelizar era el más adecuado para representar los datos de concentración en las celdas/píxeles.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos:

Tamaño de píxel	Media Aritmética		Media Geométrica	
	R	Interpolación	R	Interpolación
1x1 km	0.4		0.36	
10x10 km	0.39		0.38	

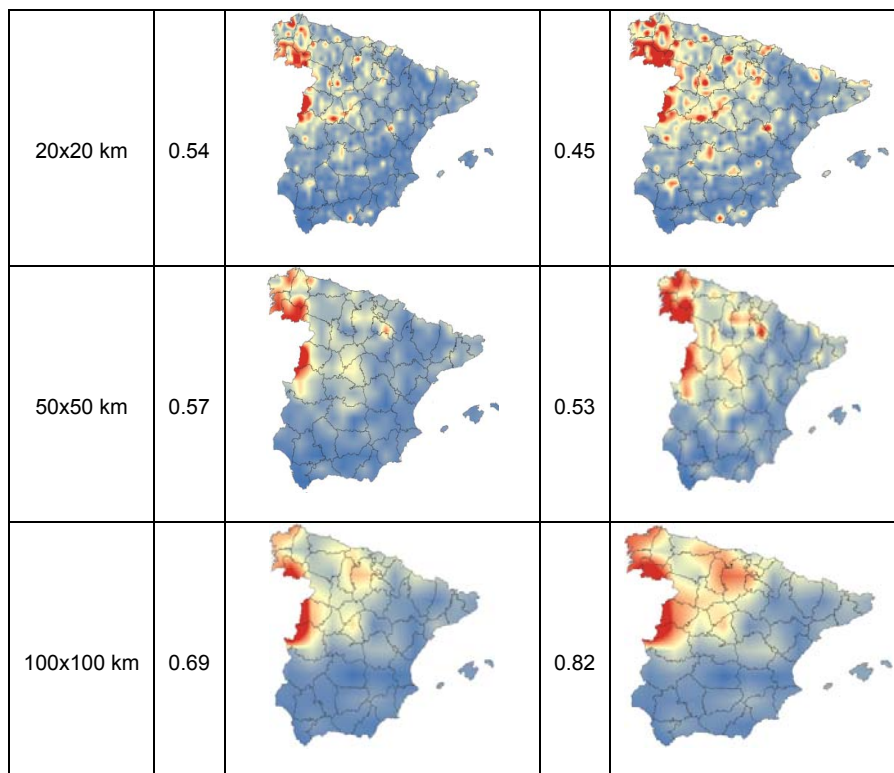


Figura 6: Elección del tamaño de píxel y de la variable que mejor representa la concentración de radón.

Como se observa en la Figura 6 (coeficiente de correlación lineal de Pearson, R), el modelo interpolador generado con el método IDW mejora utilizando la media aritmética. Esto da idea de que la escasa densidad de medidas realizadas en España hace que sea más representativa la modelización con la media aritmética. Como es de esperar, también se observa como los mapas mejoran su correlación a medida que se aumenta el tamaño de píxel, lo que en parte es también un reflejo de la escasez de datos muestreados.

1.2.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN

Para realizar una valoración inicial del método de interpolación más adecuado, se realizó una comparativa de las dos técnicas más habitualmente utilizados en la realización de este tipo de estudios, que resultan ser el IDW y el Kriging, atendiendo a que la distribución de la serie de datos sigue una distribución log normal, ambas técnicas de interpolación espacial fueron validadas de manera independiente con un 40% de la muestra de los datos de concentración de ^{222}Rn .

En la siguiente figura (figura 7) se muestra la correlación obtenida entre los píxeles generados mediante interpolación y los píxeles de la muestra independiente de evaluación, así como la representación gráfica del modelo de interpolación.

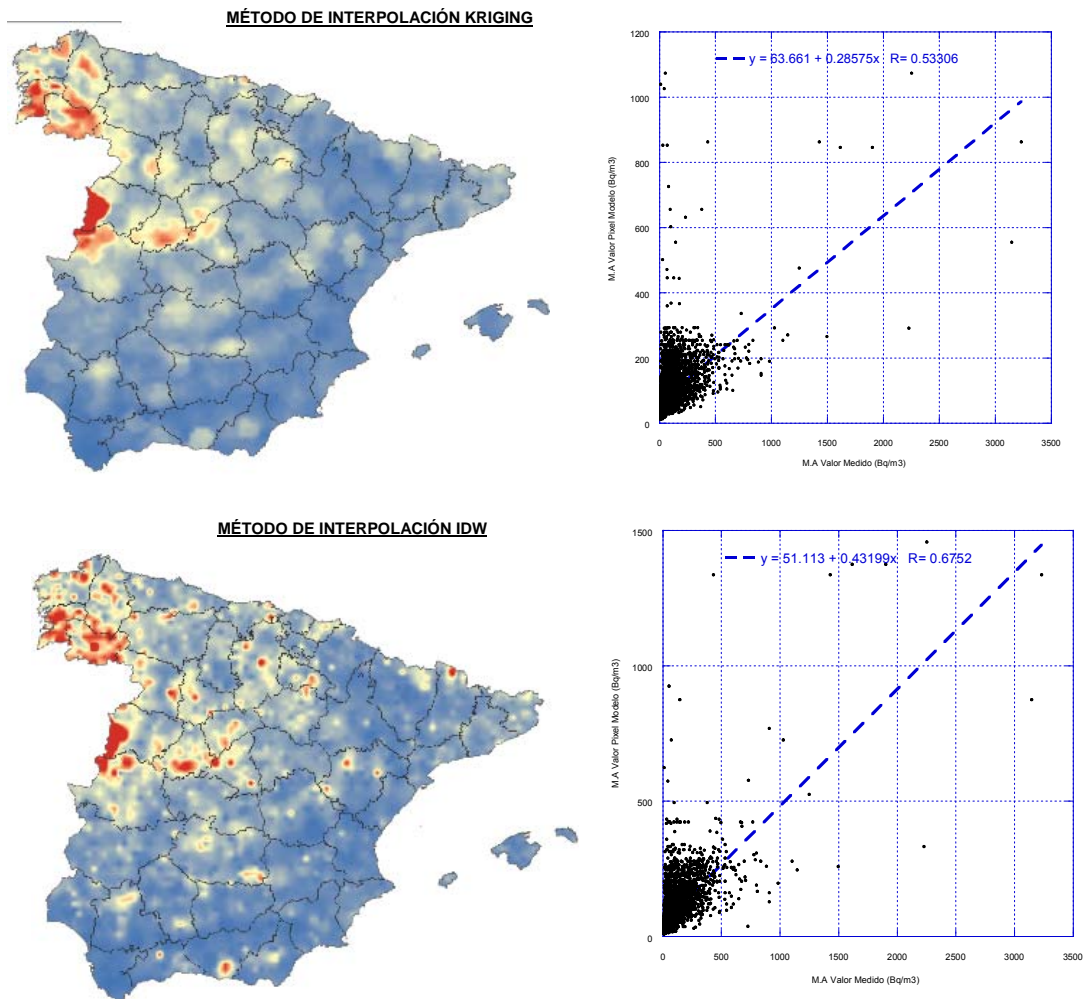


Figura 7: Comparativa de los métodos de interpolación Kriging e IDW

Valor Píxel (Bq/m ³)	Interpolación Kriging	Interpolación IDW
Mínimo	12	10
Máximo	1073	1785
Media	75	74
D.s M.A	65.38	74.39
R	0.5331	0.6752

Tabla 5: Comparativa métodos de interpolación Kriging e IDW

En la tabla 5 se observa que el rango obtenido en la modelización tipo Kriging va desde los 12 Bq/m³ a los 1073 Bq/m³. Tal y como se ha comentado anteriormente suaviza en exceso los datos en bruto, puesto que el rango de datos obtenidos en las campañas de medidas de la muestra oscila entre los 10 y los 15403 Bq/m³. En cambio, con la modelización tipo IDW el rango de datos es de 10 Bq/m³ -1785 Bq/m³. Es un rango que no suaviza tanto los datos en bruto, dando información de zonas con altas concentraciones.

Respecto a la concentración media no presentan diferencias significativas, siendo de 75 Bq/m³ en el caso del método kriging y de 74 Bq/m³ en el caso del método IDW.

Los datos que reflejan una mayor diferencia son los referidos a las desviaciones estándar: El método kriging tiene una desviación más baja (65.38) que la del método IDW (74.39), explicándose este hecho como debido a que el suavizado generalizado de los datos reduce también la desviación, además de que el mayor rango de valores está asociado una mayor desviación estándar.

Finalmente, al representar la nube de puntos que muestra píxel a píxel los datos obtenidos en la interpolación frente a los datos de la media aritmética de los valores medidos experimentalmente, se observa que la correlación es mayor en el caso del método IDW (R: 0.67) que en el método kriging (R: 0.53).

Con toda esta información previa, se concluye que el método kriging ordinario no es tan adecuado a la hora de representar los datos de concentración de radón, pues los datos no se distribuyen de forma normal. Se intentó también la interpolación mediante un modelado kriging de tipo log normal, en el que se interpola una distribución log normal en vez de unos datos distribuidos normalmente, pero también se observó que se suavizaban demasiado las medidas subestimando los puntos de altas concentraciones. No obstante, la técnica kriging, como cualquier técnica estadística compleja, puede depurarse para mejorar los resultados. Pero, esto se escapa del objeto de la tesis.

Teniendo en cuenta lo anterior, se optó por realizar la interpolación a través del método IDW (ponderación inversa a la distancia): La correlación entre el píxel teórico interpolado y el píxel real de medición es elevada debido a que este tipo de interpolación tiende a crear puntos de concentración, conservando los valores

originales. Este aspecto hace que esta técnica sea más adecuada para modelizar esta variable, pues define de manera precisa las áreas potenciales de concentración de ^{222}Rn , sin descartar los valores originales de medida. Finalmente, cabe indicar también que esta técnica se seleccionó porque no hay influencia direccional en los datos de la muestra y debido a que la intensidad del muestreo realizado en la península es a priori insuficiente para la realización de un mapa basado en la correlación espacial de las variables como es el caso del kriging.

1.2.3. ELABORACIÓN DEL MODELO DE ^{222}Rn MEDIANTE INTERPOLACIÓN: VALIDACIÓN INDEPENDIENTE DE LOS DATOS

Una vez tomada la decisión de realizar el mapa de interpolación mediante la distancia inversa ponderada (IDW), utilizando la media aritmética de las concentraciones de ^{222}Rn y con un tamaño de píxel de $10 \times 10 \text{ km}^2$, se elaboró y evaluó el grado de acierto del modelo, y por extensión de la técnica de interpolación, realizando una validación independiente de los datos a partir un muestreo aleatorio simple: se convirtieron los datos puntuales a formato ráster con un tamaño de píxel de $10 \times 10 \text{ km}^2$, ajustándose al sistema de celdas anteriormente descrito.

Se seleccionó el 60% de los datos para su utilización como datos de análisis y el 40% restante fue reservado para la validación. A partir del 60% de los datos de análisis se generó un modelo de interpolación, dando como resultado un ráster continuo de la península que ofrece un valor interpolado para cada celda de 100 km^2 del territorio. Este ráster se combinó con el ráster del 40% de la muestra independiente para su comparación.

La representación de la nube de puntos que refleja para cada píxel con muestra independiente los valores generados por interpolación de los datos de análisis frente a los valores propios de la muestra de validación indica el grado de efectividad de este método interpolador. Su correlación es $R= 0.85$ (figura 8), por lo tanto, se considera un método válido y fiable para interpolar la concentración de radón.

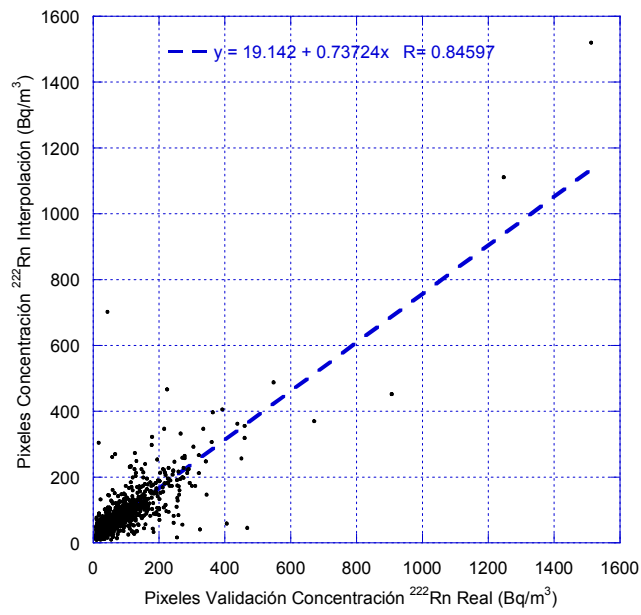


Figura 8: Efectividad del mapa de interpolación de concentración de ^{222}Rn

El resultado es el que se muestra en la figura 9 en donde se observa la interpolación de los datos de concentración de ^{222}Rn .

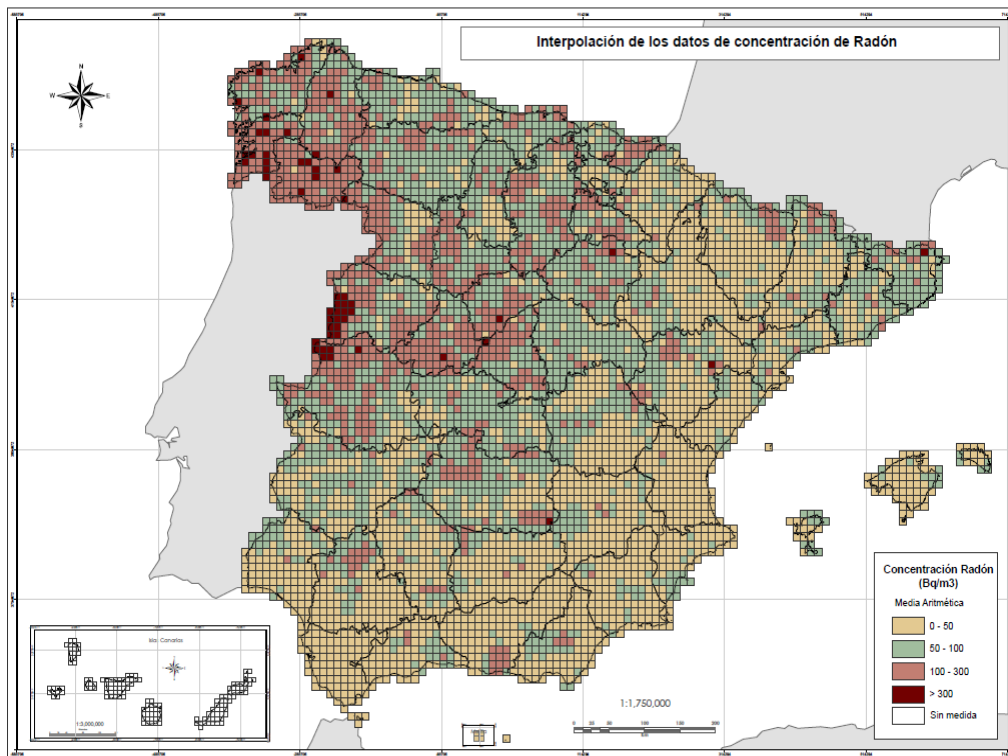


Figura 9: Interpolación de los datos de concentración de ^{222}Rn .

Esta interpolación permitió cubrir las celdas sin medición del Mapa español de concentración ^{222}Rn de medidas directas: en los píxeles en los que no existía información se utilizaron los píxeles generados en la interpolación, mientras que en los píxeles en los que existían valores puntuales se empleó el dato de la medida directa.

El mapa resultante de la combinación de los datos directos y datos interpolados es el Mapa de Concentración de ^{222}Rn final (figura 10), a partir del cual se analizaron el resto de las variables del presente estudio.

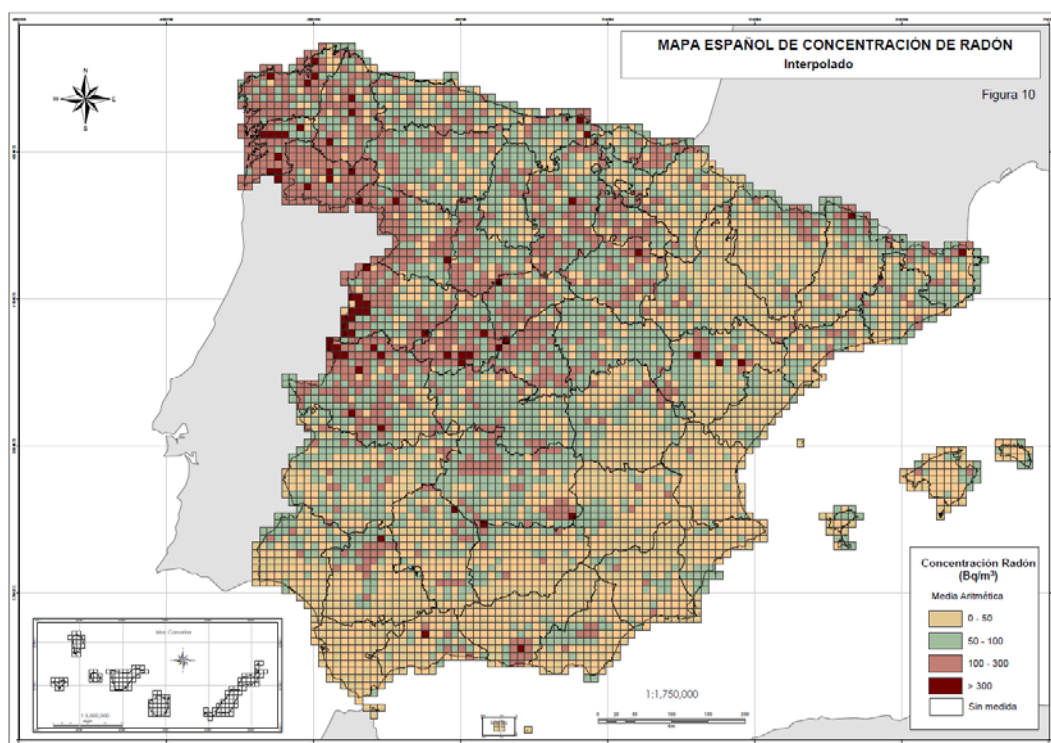


Figura 10: Mapa Español Interpolado de Concentración ^{222}Rn .

El 21 % de las celdas de este mapa interpolado se encuentran en el rango de 100 y 300 Bq / m³ y el 1 % tienen medias aritméticas superiores a 300 Bq / m³.

Al comparar los datos de concentración entre mapa de medidas directas y el mapa interpolado (tabla 6) se comprueba su similitud en todos los rangos de concentración, aunque se aprecia un leve descenso del porcentaje en las altas concentraciones (del 24% al 21%) y un incremento en las concentraciones de entre 50-100 Bq/m³ (del 31% al 35%).

Bq/m ³	Mapa Español de ²²² Rn Medidas Directas		Mapa Español de ²²² Rn Interpolado	
	Nº de Celdas	%	Nº de Celdas	%
< 50	1482	45	2361	44
50-100	1048	31	1849	35
100-300	716	22	1046	20
> 300	59	2	72	1

Tabla 6: Concentración de ²²²Rn por celda en el mapa de medidas directas y el mapa interpolado

Si se comparan los estadísticos descriptivos de ambos mapas (tabla 7), en el mapa interpolado la media aritmética se reduce respecto a los datos del mapa de medidas directas de 79.58 Bq/m³ a 75.11 Bq/m³, reduciéndose del mismo modo su desviación estándar de 111.1Bq/m³ a 95.99 Bq/m³.

	Min	Max	M.A	Ds	Mediana	Varianza	Asimetría	Curtosis
Mapa ²²² Rn Medidas Directas	10	3146	79.58	111.1	56	12345	13.99	312.79
Mapa ²²² Rn Interpolado	10	3146	75.11	95.99	55	9214.1	14.275	353.27

Tabla 7: estadística de las celdas en mapa de medidas directas y mapa interpolado

El descenso del porcentaje de celdas en altas concentraciones y la reducción de la media aritmética indica que gran parte de las celdas interpoladas lo han sido en zonas de bajas concentraciones.

De manera general se observa que las celdas con mayores concentraciones de radón (>100 Bq/m³) se corresponden con el dominio del Macizo Ibérico, en donde predominan las rocas silíceas: incluye entre otras las formaciones graníticas del Sistema Central (Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila), el Macizo Galaico-Portugués, y la zona oeste de Salamanca y Zamora junto con áreas puntuales de Badajoz, Córdoba o Gerona. Esta correspondencia con altas concentración se corresponde también con las zonas metamórficas del oeste de península y en zonas del Sistema Ibérico.

Las celdas de menores concentraciones (< 100 Bq/m³) aparecen en zonas sedimentarias en las que predominan las rocas detríticas (cuencas del Duero, Tajo, Ebro y Guadalquivir), y las rocas carbonatadas (principalmente en los relieves alpinos de Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico y parte de las Béticas).

De manera puntual se observan la presencia de altas concentraciones en celdas aisladas en las que a priori no debería haber valores elevados. Estas celdas pueden ser “puntos calientes” en donde realmente existan altas concentraciones de radón, o bien ser un dato puntual sesgado que pueda llevar a conclusiones erróneas.

Para analizar la variabilidad de las medidas obtenidas se elaboró un mapa de desviaciones estándar.

Su representación se basó en los dos tipos de orígenes de celdas, en función del número de medidas de radón: En las celdas realizadas a partir de las mediciones directas con más de una medida se empleó la desviación estándar de estas celdas, y en el caso de las celdas con una sola medida se utilizó la incertidumbre asociada a esta como indicador de variabilidad.

En las celdas interpoladas, para calcular su desviación estándar se empleó la técnica de generación de polígonos Thissen basada en de la triangulación de Delaunay (ESRI, 2016a) la cual permite crear un mapa (Mapa Voronoi) que calcula las desviaciones estándar por sectores a partir de sus vecinos próximos.

Se representan en 3 categorías a partir de sus cuartiles: las celdas con medida directa y más de 1 medida tienen un rango de entre 0 a 5249 Bq/m³ quedando agrupadas sus clases en 0-21, 21-59 y 59-5249 Bq/m³. Las celdas con medida directa con una única medición tienen un rango de entre 10 y 907Bq/m³ siendo sus clases 10-31,31-68 y 68-907 Bq/m³. Y las celdas interpoladas su rango varía entre 1 y 1334 Bq/m³ siendo sus categorías 1-13,13-28 y 38-1334 Bq/m³. (Figura 11)

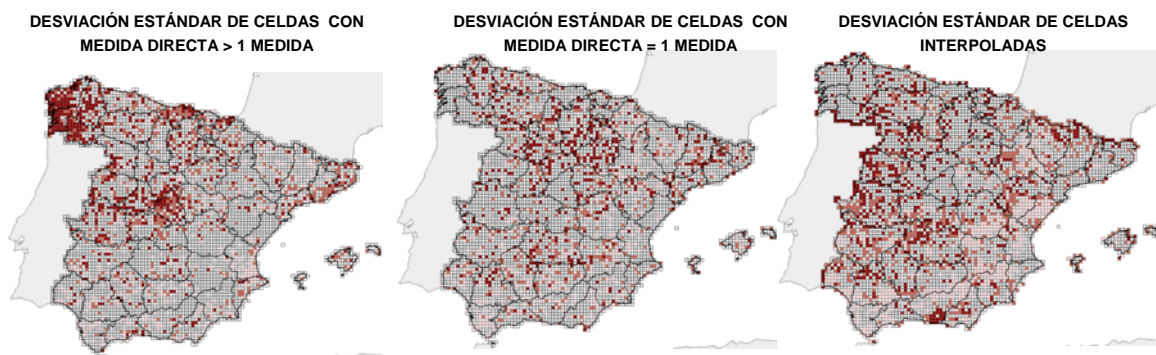


Figura 11: Desviación estándar según el origen de las celdas

La combinación de estos datos en un único mapa es el Mapa de coeficientes de variación de concentración de ^{222}Rn (figura 12). En él se refleja de manera relativa la variabilidad de las medidas obtenidas de concentración de ^{222}Rn en cada celda 10 x 10 km² a partir de su desviación estándar media (Desviación Estándar Media / Concentración de ^{222}Rn). Los datos se representan como coeficiente de variación en 3 categorías a partir de sus cuartiles: 0-0.40%, 0.40-1% y 1-5.2%

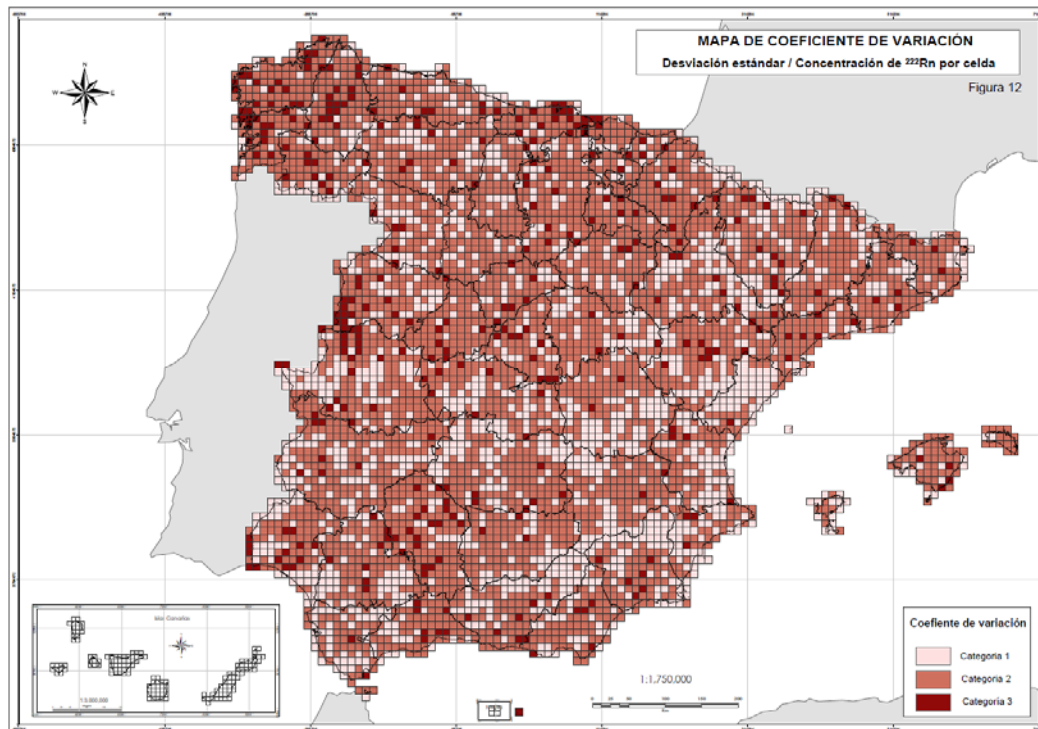


Figura 12: Coeficiente de variación a partir de la desviación estándar de la concentración de ^{222}Rn por celda

Para una interpretación más precisa de los datos, se ha calculado el número de medidas por celda 10x10km² a partir de su desviación estándar media y se han comparado los datos obtenidos

Al analizar estos datos a partir de las concentraciones de ^{222}Rn obtenidas (tabla 8) se comprueba en ambos casos que a medida que aumentan las concentraciones aumenta su desviación estándar, siendo los promedios de este mapa de 36.86 en el caso de la comparativa por número de medidas (Desviación Estándar Media / N^o de medidas), y de 0.66 en el caso de compararlas a partir de las concentraciones de radón (Desviación Estándar Media / Concentración de ^{222}Rn).

Bq/m ³	D.S Media /Nº de medidas	D.S Media /Concentración de ²²² Rn
< 50	15.9	0.64
50-100	33.55	0.63
100-300	73.41	0.74
> 300	276.41	0.94

Tabla 8: Desviaciones estándar relativas

Si se analiza esta variabilidad a partir del número de medidas realizadas por celda (tabla 9) se observa que en el primer caso (Desviación Estándar Media /Nº de medidas) la mayor variabilidad aparece en las celdas en las que se realizaron una o dos medidas (53.44) siendo más o menos estable entre las 3 y 12 medidas, reduciéndose de manera clara a partir de las 12 medidas realizadas por celda (6.16). En el segundo caso (Desviación Estándar Media / Concentración de ²²²Rn) se observa que las mayores desviaciones aparecen en las celdas de entre 1 y 2 medidas y en las celdas con más de 12 mediciones.

Nº de medidas por celda	D.S Media /Nº de medidas	D.S Media /Concentración de ²²² Rn
Sin Medida	31.74	0.44
1 – 2	53.44	0.86
3 – 4	15.82	0.59
5 – 6	18.45	0.69
7 – 12	12.79	0.77
> 12	6.16	0.92

Tabla 9: Desviaciones estándar relativas según número de medidas por celda

Con estos datos se comprueba la importancia que tiene el número de medidas realizadas a la hora de determinar las concentraciones de radón de una zona: a medida que se incrementa el número de medidas, se reduce la desviación estándar de concentración de ²²²Rn. Los datos de concentración de radón por lo tanto serán más fiables en cuanto exista una densidad de muestreo por celda 10x10 km² lo suficientemente significativa. Que las desviaciones estándar se incrementen a medida que aumentan las concentraciones de ²²²Rn y el número de medida realizadas da idea de la gran variabilidad de las posibles concentraciones de radón que se pueden encontrar en un área de 10 x 10 km².

Un aspecto importante del estudio es analizar la cantidad de población que se encuentra en áreas con concentraciones de ^{222}Rn superiores a los 100 Bq/m³. Del total de los 46,468,102 millones de habitantes de España (INE, 2014), el 21 % (844,4784 habitantes) se encuentran dentro de estas celdas que superan los 100 Bq/m³ en un total de 17,688 núcleos de población (tabla 10)

Bq/m ³	Nº Entidades de población		Nº Habitantes	
	Nº	%	Nº	%
< 50	13757	29	19,334,461	49
50-100	15610	34	11789166	30
100-300	16075	34	8146408	21
> 300	1612	3	298376	0.75

Tabla 10: Entidades de población y número de habitantes en rangos de concentración de ^{222}Rn

Respecto al tamaño de estas entidades, el 96% no superan los 1000 habitantes.

Es de interés que 6 ciudades de más de 50,000 habitantes se encuentran en estas zonas (8,699,270 habitantes). Estas ciudades son Madrid, San Sebastián, Orense, Santiago de Compostela, Valdemoro (Madrid), y Ávila.

2.1 MAPA DE MEDIDAS DIRECTAS DE TASA TOTAL DE EXPOSICIÓN GAMMA NATURAL

Los datos de las tasas de exposición a la radiación gamma obtenidos del proyecto MARNA se analizaron a partir de las medidas de tendencia central, observándose que no siguen una distribución normal. La escasa dispersión de las medidas se muestran en su baja desviación estándar (2.97 $\mu\text{R/h}$) y varianza. Además su coeficiente de variación es de 34.60% (inferior a 100) por lo que se comprueba que no existen problemas con los datos extremos de la muestra. (Tabla 11).

Número de datos: 7424	Moda: 5.17 $\mu\text{R/h}$
Mínimo: 4.090 $\mu\text{R/h}$	Coeficiente de Asimetría: 1.35
Máximo: 22.86 $\mu\text{R/h}$	Curtosis: 4.72
Media Aritmética: 8.58 $\mu\text{R/h}$	1 ^{er} cuartil: 6.56
Desviación Estándar (M.A): 2.97	3 ^{er} cuartil: 9.87
Media Geométrica: 8.15	Varianza: 8.82
Desviación Estándar (M.G): 1.37	Coeficiente de Variación: 34.60
Mediana: 7.67 $\mu\text{R/h}$	

Tabla 11: Resumen estadístico de los datos de tasas de radiación gamma natural.

El análisis de la forma de la muestra indica una distribución leptocúrtica (coeficiente de curtosis 4,72) con una asimetría positiva (coeficiente de asimetría 1.35).

La representación gráfica de la distribución a través del gráfico Cuantil-Cuantil (Q-Q Plot) muestra como los datos de concentración de ^{222}Rn no se aproximan a la recta, por lo que no se distribuyen de forma normal (figura 13).

Y el histograma (figura 14) refleja que la distribución de las medidas presenta una distribución log normal. Este hecho también se tuvo en cuenta al realizar el modelo de interpolación de esta variable.

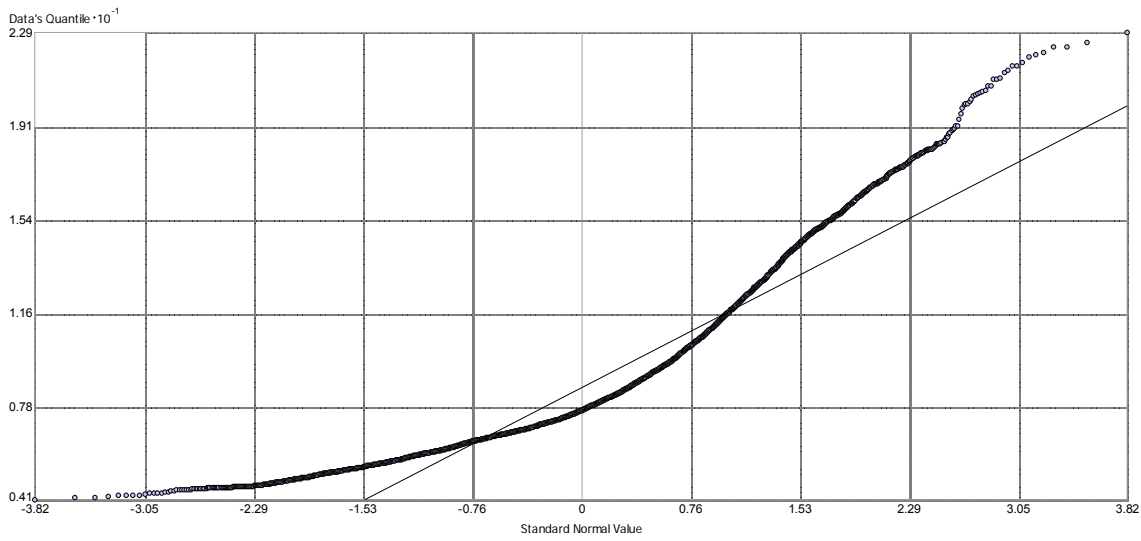


Figura 13: Gráfico QQplot de los datos de tasa total de exposición gamma total.

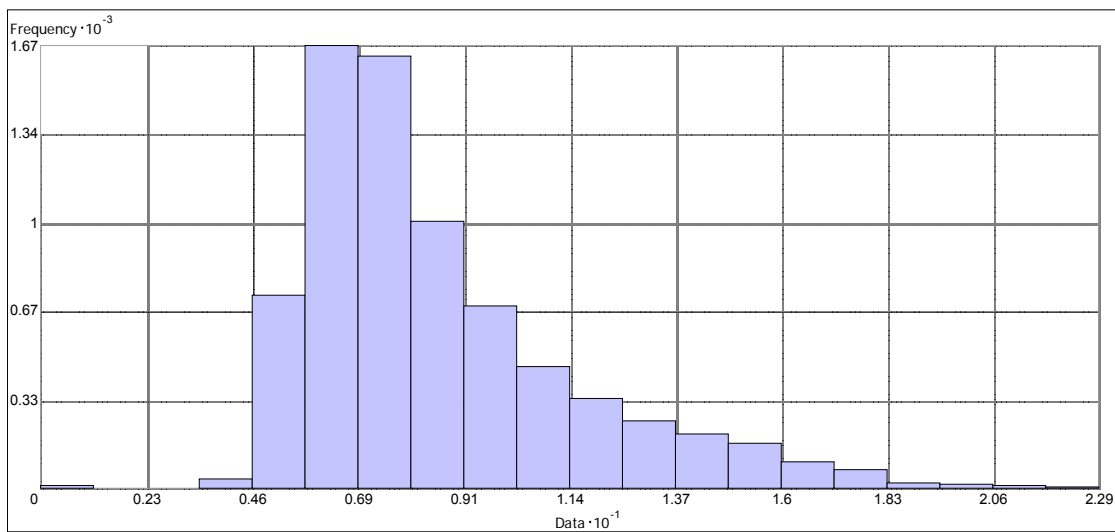


Figura 14: Distribución de los datos de tasa total de exposición gamma total.

Estos datos de tasa de exposición a la radiación gamma se representaron gráficamente en el sistema de celdas 10 x 10 km², elaborándose el Mapa de tasa exposición gamma de medidas directas (figura 15) que cubre de forma directa el 63% del territorio peninsular (3358 celdas).

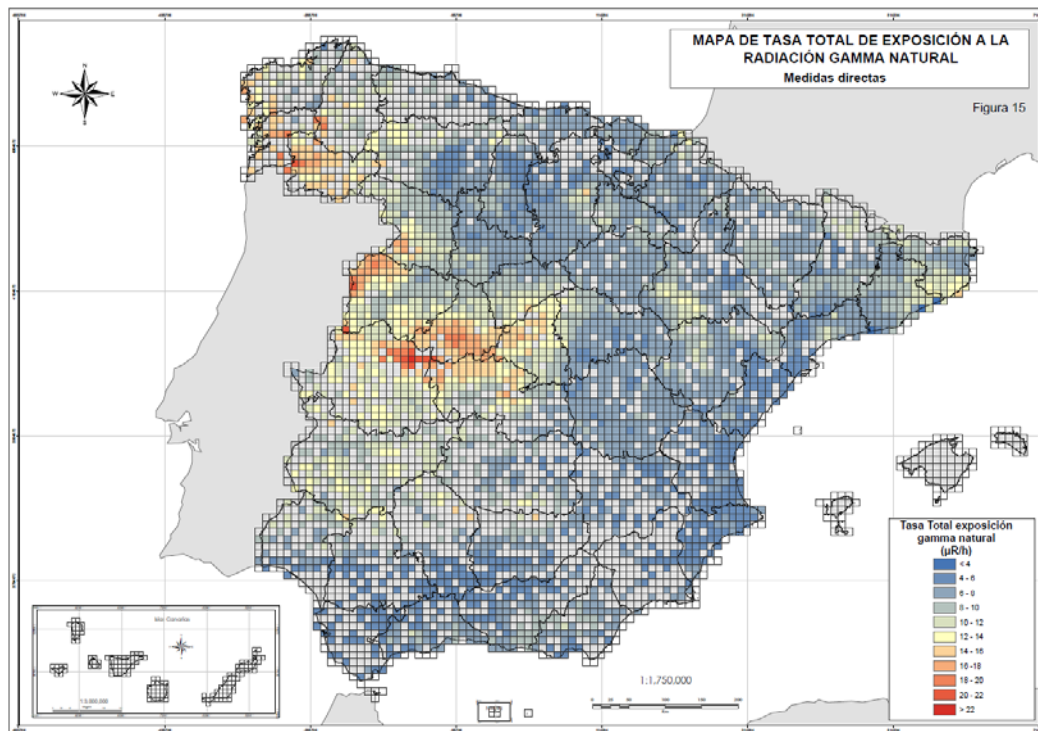


Figura 15: Mapa de tasa total de exposición a la radiación gamma natural medidas directas.

2.2 MAPA INTERPOLADO DE TASA TOTAL DE EXPOSICIÓN GAMMA NATURAL

Para cubrir el 37% restante se interpolaron los datos. En el análisis previo se comprobó que los datos presentaban una distribución log normal, por lo que se interpoló esta variable a partir del método IDW.

Del mismo modo que en el caso de la interpolación de los datos de concentración de radón, se realizó una validación independiente de los datos interpolados a partir de un muestreo aleatorio simple, con el 60% de los datos para su utilización como análisis y el 40% restante para la validación.

La representación de la nube de puntos que muestra la comparación entre los valores obtenidos por interpolación y los valores reales de la muestra de validación. El grado de efectividad del modelo de interpolación, en este caso es de $R = 0.99$ (figura 16).

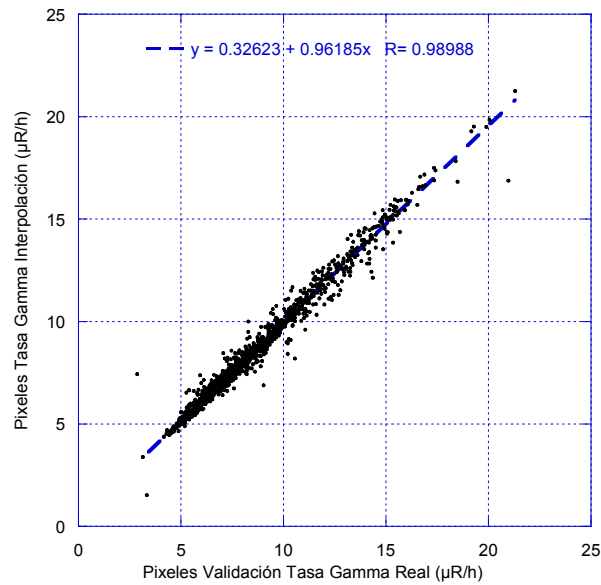


Figura 16: Píxeles de análisis y validación y su correlación.

Esta interpolación cubrió las celdas en las que no existía información y en los píxeles en los que existía se empleó el dato de la medida directa disponible. El resultado es el mapa de tasa total de exposición a la radiación gamma natural interpolado (figura 17).

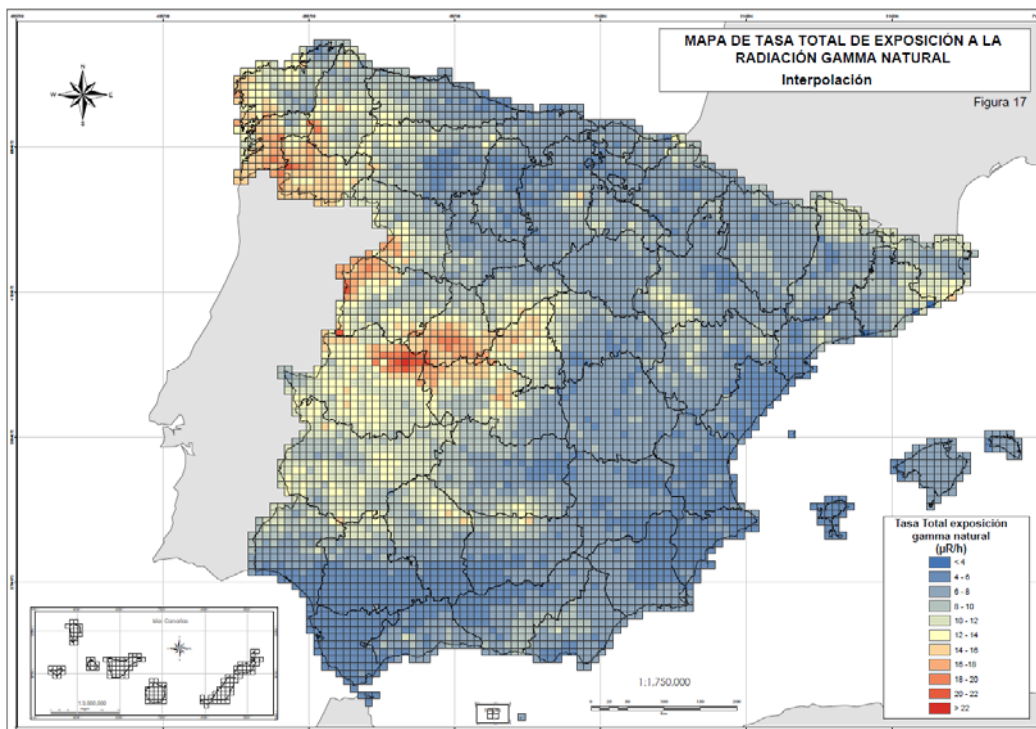


Figura 17: Mapa interpolado de tasa total de exposición a la radiación gamma natural.

Al comparar la estadística de ambos mapas (tabla 12) se observa que los parámetros no son significativamente diferentes.

	Min	Max	M.A	D.s MA	Mediana	Varianza	Asimetría	Curtosis
Mapa Tasa exp. gamma Medidas	1.87	21.79	8.58	2.98	7.63	8.90	1.26	1.43
Mapa Tasa exp. gamma Interpolado	1.87	21.79	8.49	2.84	7.53	8.06	1.21	1.22

Tabla 12: Estadística de las celdas del mapa de medidas directas y del mapa interpolado.

Para comprobar la relación de la tasa de exposición gamma respecto a las concentraciones de ^{222}Rn se realizó un análisis de regresión simple a través de la correlación lineal de los dos mapas, estudiando la relación entre los valores de ambos mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson. El resultado se observa en la siguiente figura 18.

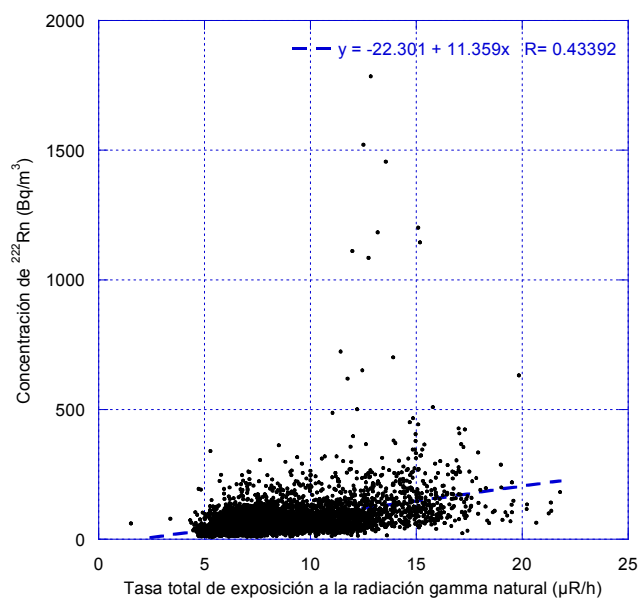


Figura 18: Correlación concentración de ^{222}Rn y tasa de radiación gamma

Se observa una tendencia creciente con un coeficiente R de 0.43. En una primera aproximación se deduce que a mayores tasas de radiación gamma existe mayor probabilidad de encontrar altas concentraciones de ^{222}Rn .

Analizando las tasas medias de radiación gamma respecto a los rangos de concentración de del mapa interpolado de ^{222}Rn (tabla 13) se comprueba la relación mencionada entre ambas variables.

	Tasa media de radiación gamma		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Tasa media	7.91 $\mu\text{R/h}$	10.55 $\mu\text{R/h}$	12.47 $\mu\text{R/h}$
Desviación estándar	2.43 $\mu\text{R/h}$	3.33 $\mu\text{R/h}$	3.41 $\mu\text{R/h}$

Tabla 13: Tasa media de radiación gamma respecto a las concentraciones de ^{222}Rn .

Pero al analizar los datos de desviaciones estándar de la radiación gamma para cada uno de los rangos, se comprueba que la identificación de las concentraciones de ^{222}Rn a través de las tasas puede llevar a identificaciones erróneas, pues existen zonas de bajas concentraciones en las que cabe la posibilidad que se encuentren en el rango de las concentraciones medias ($7.91 \mu\text{R/h} \pm 2.43 \mu\text{R/h}$), zonas de concentraciones medias que puede que realmente sean de bajas o altas concentraciones ($10.55 \mu\text{R/h} \pm 3.33 \mu\text{R/h}$) y zonas de altas concentraciones que puedan ser áreas de concentraciones medias ($12.47 \mu\text{R/h} \pm 3.41 \mu\text{R/h}$).

Para estudiar esta variable de manera más precisa, se categorizaron los datos de tasas de este mapa interpolado, atendiendo al criterio establecido en el mapa predictivo de exposición al radón en el que las tasas de menos de $7.5 \mu\text{R/h}$ se las considera zonas de riesgo bajo, las zonas de entre 7.4 - $14 \mu\text{R/h}$ son de riesgo medio y las zonas con tasas de más de $7.5 \mu\text{R/h}$ se las considera de riesgo alto. (Figura 19).

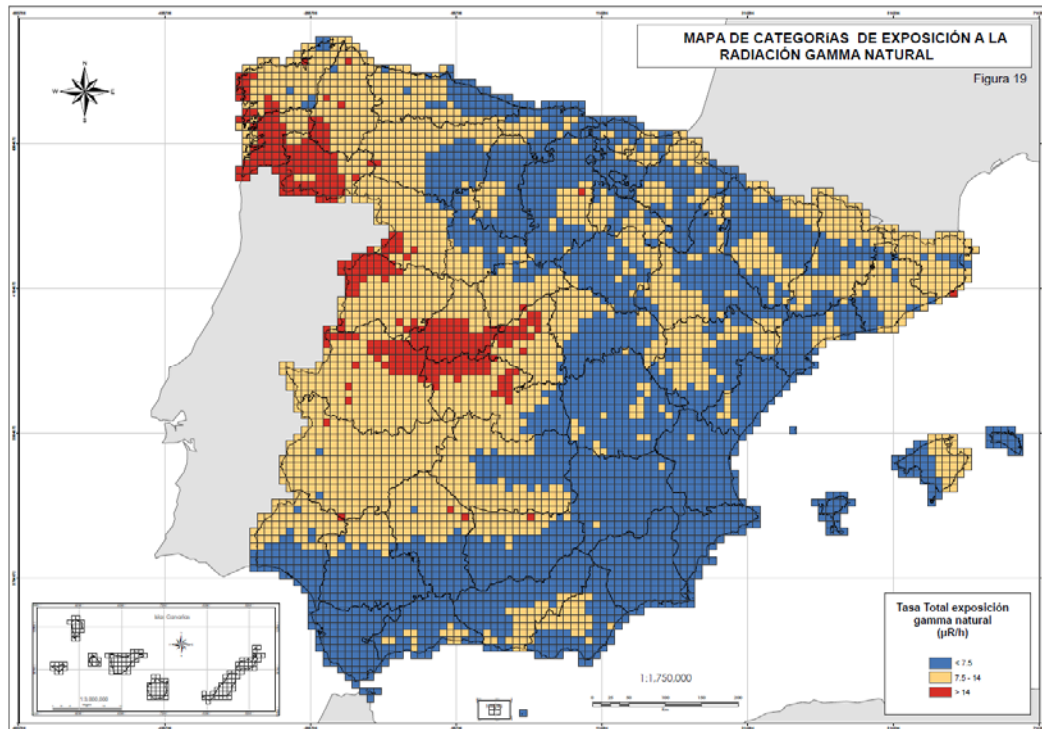


Figura 19: Categorías de exposición a la radiación gamma natural.

Casi la mitad de la península (el 49% de las celdas) se encuentra por debajo de los 7.5 µR/h, un 45% en el rango de entre 7.5-14 µR/h y el 6% restante tienen tasas por encima de los 14µR/h (tabla 14).

	Tasa de exposición gamma		
	<7,5 µR/h	7,5 – 14 µR/h	> 14 µR/h
Nº de celdas	2611 (49%)	2386 (45%)	330 (6%)

Tabla 14: Número de celdas por categorías de exposición a la radiación gamma natural.

Al solapar estas zonas de altas tasas de exposición gamma con las zonas de altas concentraciones de ²²²Rn se observa una elevada coincidencia, por ello se realizó una comparativa para estudiar la correlación entre ambas variables. En la comparativa se parte de las equivalencias presentadas en el mapa predictivo de exposición al ²²²Rn (García et al., 2013a), en donde 100 Bq/m³ equivalen a 5 µR/h y 300 Bq/m³ equivale a 14 µR/h, tomándose en consideración únicamente las celdas que coinciden en el mismo rango de tasa como de concentración.

Se comprueba (tabla 15) que el nivel predictivo de la tasa de radiación gamma en las zonas de altas concentraciones es aceptable (39%). El mayor nivel de coincidencia

aparece en las celdas de tasas medidas (76%) mientras que su capacidad predictiva se reduce al 2% en las zonas con menores tasas.

	Coincidencia entre Tasa de exposición gamma-Concentración de ^{222}Rn		
	<7.5 $\mu\text{R/h}$ (100Bq/m ³)	7.5 -14 $\mu\text{R/h}$ (100-300 Bq/m ³)	> 14 $\mu\text{R/h}$ (>300 Bq/m ³)
Nº de celdas	99 (2%)	793 (76%)	28 (39%)

Tabla 15: Coincidencia entre Tasa de exposición gamma-Concentración de ^{222}Rn .

Actualmente, en España la identificación de áreas geográficas con posibles altas concentraciones de ^{222}Rn residencial se basa en la utilización del mapa de radiación gamma natural (Proyecto MARNA), que evalúa la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de origen natural a 1 metro sobre el suelo, así como en la utilización del mapa de emisión potencial de ^{222}Rn calculado a partir de aquel. Estos mapas pueden ser útiles a la escala estatal como primera aproximación para la identificación de zonas con probabilidad de presencia de altas concentraciones de radón, pero no son fiables en la identificación a una escala local o puntual para cada vivienda. Esto es debido a que en la concentración de ^{222}Rn varía según las características de la edificación, de los hábitos de ventilación, de las características ambientales del área o de los factores geológicos en donde esté edificada.

Además, utilizar la tasa de exposición a la radiación gamma total como único identificador de zonas potenciales al radón puede ser efectivo como primera aproximación para identificar la posible concentración de radón de un área pero también puede llevar a estimaciones erróneas pues agrupa los datos de las contribuciones del ^{40}K y ^{232}Th que no contribuyen a la presencia del gas radón en las viviendas.

2.3 CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE ^{226}Ra EN SUELOS

2.3.1 MAPA DE MEDIDAS DIRECTAS DE CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE ^{226}Ra EN SUELOS

Los datos de concentración de ^{226}Ra en suelos fueron estimados a partir de la tasa de radiación gamma a través de la ecuación (García et al., 2013a).

$$\text{CRa} = 5.3 * T_{\text{total}} - 2.39$$

Donde

CRa = Concentración de ^{226}Ra en suelos (Bq/kg)

T total= Tasa de exposición gamma total ($\mu\text{R/h}$)

La estadística de los datos (tabla 16) y la representación gráfica de la distribución a través del gráfico de cuartiles (figura 20) muestran que los datos no siguen una distribución normal

Número de datos: 7424	Coefficiente de Asimetría: 1.34
Mínimo: 80.49 Bq/kg	Curtosis: 4.70
Máximo: 448.34 Bq/kg	1 ^{er} cuartil: 128.51 Bq/kg
Media Aritmética: 168.28 Bq/kg	3 ^{er} cuartil: 193.53 Bq/kg
Desviación Estándar (M.A): 58.334	
Media Geométrica:	
Desviación Estándar (M.G):	
Mediana: 150.53 Bq/kg	

Tabla 16: Resumen estadístico de los datos de concentración de ^{226}Ra .

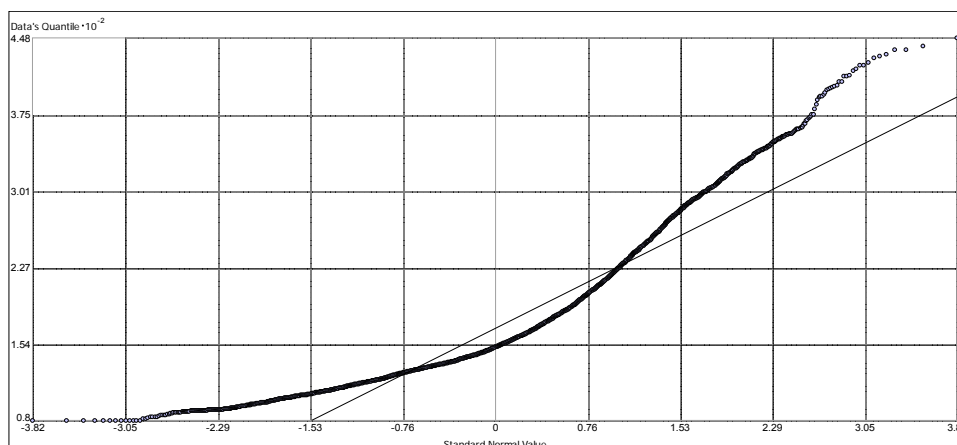


Figura 20: Gráfico QQplot de los datos de concentración de ^{226}Ra .

Como era de esperar a partir de lo observado en el análisis de la tasa de exposición total, el histograma refleja que los datos se ajustan a la una distribución log normal (figura 21).

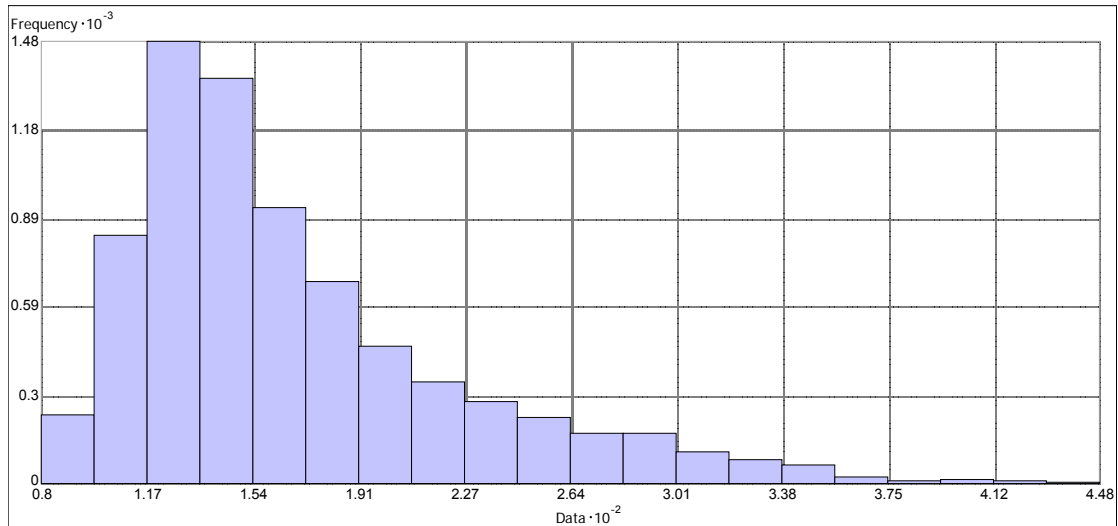


Figura 21: Distribución de los datos concentración de ²²⁶Ra.

Estos datos se representan generándose el mapa de medidas directas de concentraciones de ²²⁶Ra estimadas a partir de la tasa gamma total (figura 22).

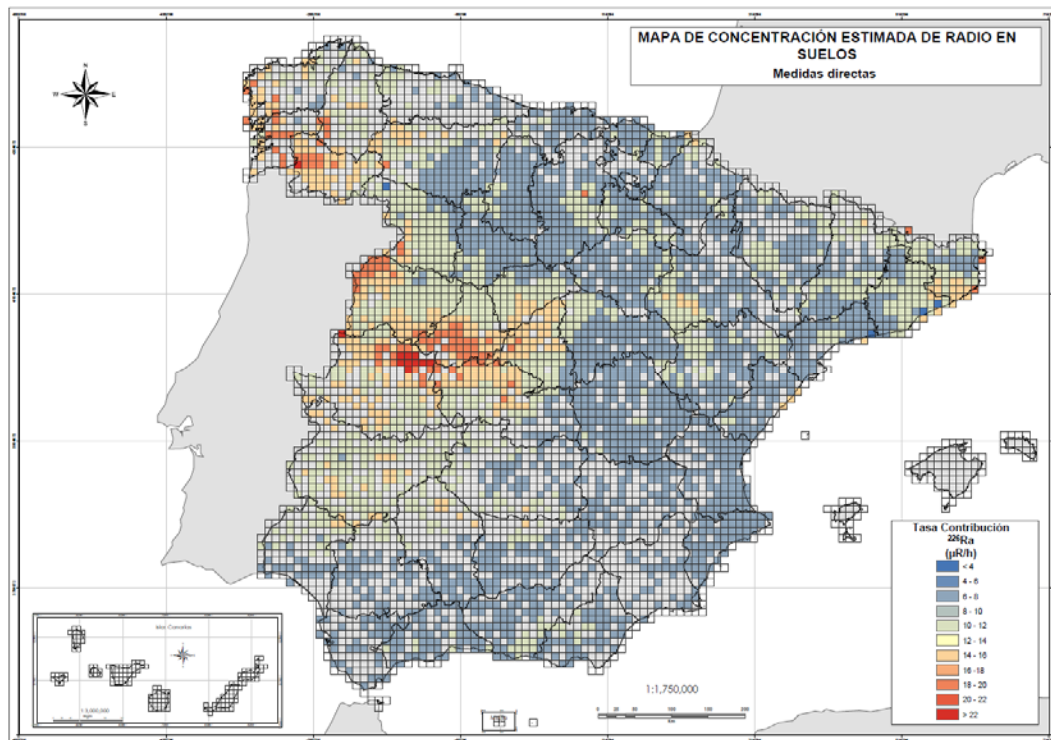


Figura 22: Mapa medidas directas de concentración de ²²⁶Ra estimado en suelos.

2.3.2 MAPA INTERPOLADO DE CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE ^{226}Ra EN SUELOS

Para cubrir las celdas sin información se realizó una interpolación de los datos mediante el método IDW comprobándose su efectividad mediante una validación independiente de los datos. Del mismo modo que en el caso de la tasa de radiación gamma, esta interpolación cubrió las celdas en las que no existía información.

El mapa interpolado de concentración de ^{226}Ra en suelos combina las celdas interpoladas en las que previamente no existía información y las celdas con medidas directas (figura 23).

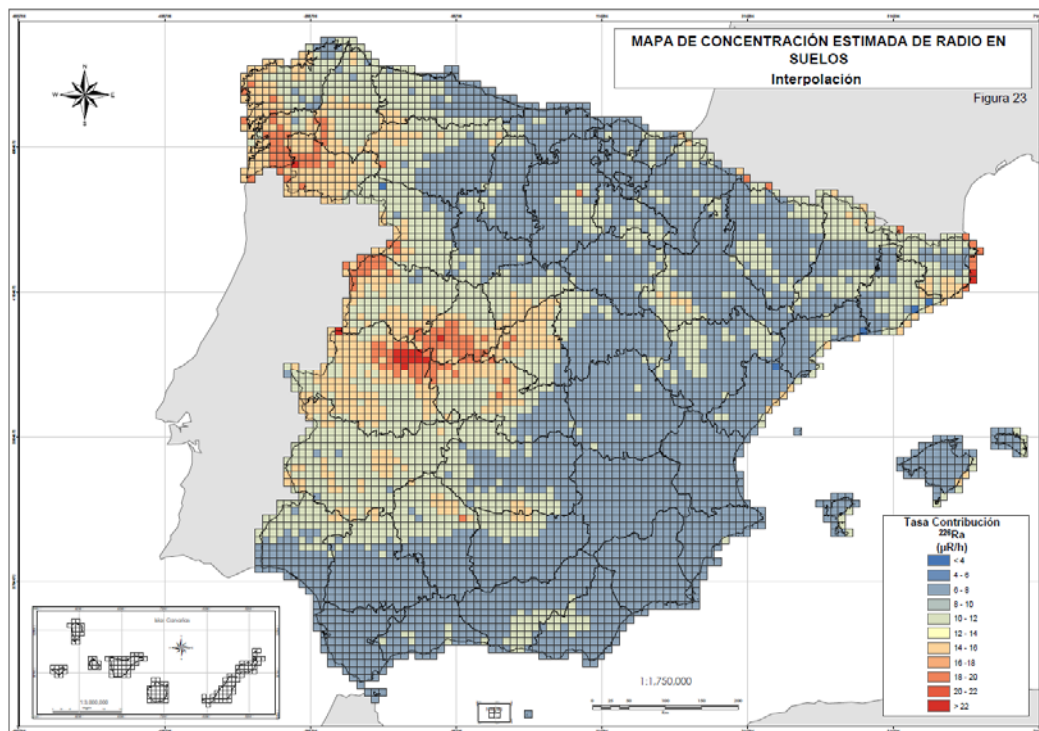


Figura 23: Mapa interpolado de concentración de ^{226}Ra estimado en suelos.

La comprobación de la relación entre la concentración de ^{226}Ra en suelos respecto a las concentraciones de ^{222}Rn se realiza mediante un análisis de regresión simple (figura 24). El resultado es una tendencia positiva marcada por un R de 0.40.

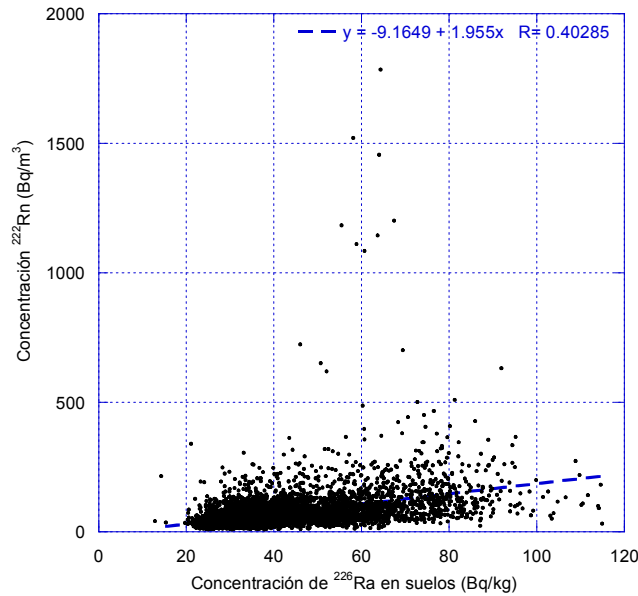


Figura 24: Correlación entre la concentración de ²²²Rn y la concentración estimada de ²²⁶Ra en suelos

La concentración media de ²²⁶Ra obtenida para los diferentes rangos de concentración de ²²²Rn es la que se muestra en la tabla 17.

	Concentración media de ²²⁶ Ra en suelos		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Concentración media	39	55	67

Tabla 17: Concentración media de ²²⁶Ra en suelos según rangos de concentración de ²²²Rn.

Esta concentración de ²²⁶Ra estimada a partir de la tasa gamma externa es más elevada en las celdas con mayores concentraciones. Se deduce que a mayores concentraciones de ²²⁶Ra en suelos existe una mayor probabilidad de encontrar altas concentraciones de ²²²Rn. Pero hay que señalar que esta concentración de ²²⁶Ra en suelos al ser estimada a partir de la tasa total de exposición a la radiación gamma no es una variable realmente independiente pues su capacidad predictiva depende directamente de los datos de exposición gamma.

La capacidad predictiva del ²²⁶Ra se podría poner de manifiesto a escala local, especialmente mediante la toma de muestras y análisis de suelos para determinar la posible concentración de ²²²Rn en el interior de una vivienda.

3

PRESENCIA DE YACIMIENTOS DE URANIO

La capacidad predictiva de la concentración de ^{226}Ra en suelos obtenida a partir de los datos de exposición gamma no es muy precisa debido a la dependencia de esta variable. Por ello se analizó este elemento a partir de otra variable como es la presencia de materiales uraníferos.

Debido a la dificultad de obtención de una relación de la distribución espacial precisa de materiales con contenido en uranio, se realizó el estudio indirectamente, en este caso a partir de la presencia de yacimientos mineros de uranio (otras variables como la litología, que se tratarán más adelante, son también indicativos indirectos del contenido de uranio). Se tiene en consideración para analizar esta variable un radio de influencia de 20 km alrededor de estos yacimientos por entender que en este área existe la posibilidad de encontrar materiales con este elemento. Se ha utilizado este área de influencia debido a que los yacimientos en sí mismos son por lo general de pequeñas dimensiones, aunque las mineralizaciones pueden abarcar kilómetros (Arribas, A. 1975; Pérez del Villar, L., et al 1989). A partir de este radio de acción se crea el mapa de probabilidad de presencia de yacimientos de Uranio (figura 25) en donde para cada celda 10 x 10 km² se refleja la probabilidad, expresada entre 0 y 1, de encontrar este elemento.

Para homogeneizar los valores de probabilidad de las diferentes variables se reclasificaron en cuatro categorías (<0.25, 0.25-0.50, 0.50-0.75 y >0.75). En este caso al encontrarse la mayoría de los datos en una única categoría, se decidió representar gráficamente la probabilidad de yacimientos a partir de una división en cuatro categorías según sus cuartiles.

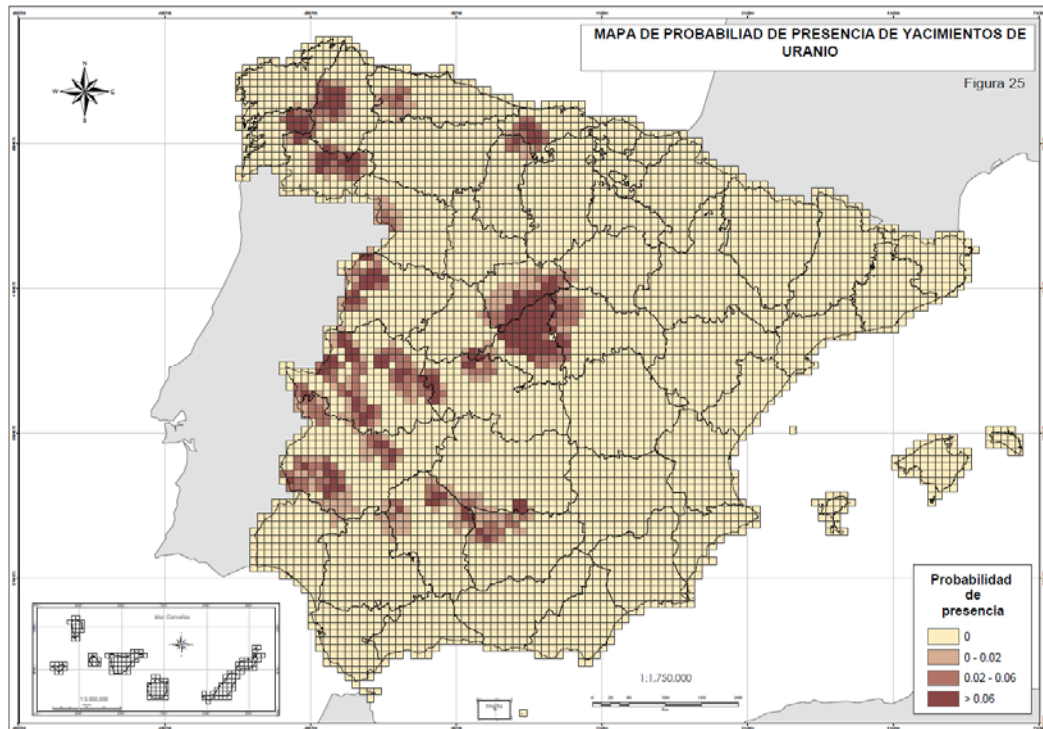


Figura 25: Mapa de probabilidad de presencia de yacimientos de Uranio.

Para comprobar la correlación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de yacimientos de Uranio se representó la nube de puntos (figura 26) que muestra una correlación de R igual a 0.15.

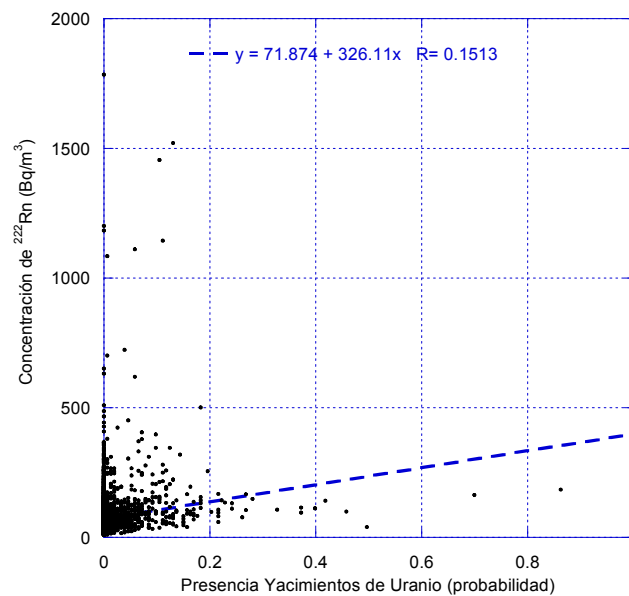


Figura 26: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de yacimientos de Uranio.

La nube de puntos indica la existencia de una tendencia ascendente en la relación entre ambas variables. Para verificar esa tendencia se analiza para cada rango de concentración de ^{222}Rn la probabilidad media de encontrar yacimientos de uranio (tabla 18): en cada rango de concentración se calculó el valor promedio de los valores obtenidos en los píxeles del mapa de probabilidad.

	Presencia de Yacimientos de Uranio		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	0.04	1.7	3.1

Tabla 18: Probabilidad media de presencia de yacimientos de uranio según rangos de concentración de ^{222}Rn .

Se observa que a medida que aumenta la densidad de yacimientos de uranio, es más probable que aparezcan mayores concentraciones de ^{222}Rn , aunque la probabilidad media de que aparezcan altas concentraciones en zonas próximas a yacimientos de uranio es del 3.1%

Para comprobar estos resultados previos, se compararon las concentraciones de ^{222}Rn obtenidas de manera directa dentro y fuera del radio de acción de 20 km alrededor de estos yacimientos: La concentración media de ^{222}Rn a menos de 20 km de los yacimientos de uranio es de 139 Bq/m³, superando la media nacional, en cambio la media obtenida fuera de este área de influencia se reduce a 93 Bq/m³.

La siguiente tabla 19 muestra los datos agrupados según concentraciones.

	Concentración de ^{222}Rn dentro de los 20km		Concentración de ^{222}Rn fuera de los 20km	
	Nº Datos	%	Nº Datos	%
Media Aritmética ^{222}Rn (Bq/m ³)	139 Bq/m ³		93 Bq/m ³	
>300	153	9	400	4
100-300	500	28	1979	22
<100	1146	64	6718	74

Tabla 19: Concentración de ^{222}Rn y presencia de yacimientos de uranio.

La mayoría de los datos analizados tanto dentro como fuera del área de influencia de 20 km se encuentran en zonas con concentraciones inferiores a los 100 Bq/m³, pero

es reseñable que el 9% las medidas realizadas en zonas a menos de 20 km de los yacimientos de uranio tengan concentraciones superiores a los 300 Bq/m³.

Con estos resultados obtenidos, se puede deducir que la proximidad a zonas uraníferas se relacionan con las altas concentraciones de radón, debido principalmente a que estas áreas presentan de forma natural un alto contenido en ²³⁸U, a partir del cual se genera el ²²⁶Ra y posteriormente el ²²²Rn. Pero la escala de observación a la cual se ha realizado el análisis no permite determinar una relación lo suficientemente fuerte entre la presencia de yacimientos de uranio y altas concentraciones de ²²²Rn, debido principalmente a que generalmente los yacimientos aparecen en franjas de pocos centenares de metros y a que las mineralizaciones de uranio suelen distribuirse de forma discontinua en el territorio. Además, no se realista tratar de asimilar los yacimientos de uranio (o las zonas de alta concentración de uranio) a círculos. En la naturaleza tienden a ser bandas. Por ello, las unidades litológicas o litoestratigráficas constituyen indicadores geológicamente más coherentes.

4

PRESENCIA DE FALLAS

Las fallas son estructuras geológicas que constituyen un camino que puede favorecer la presencia de radón en el terreno. La denominada porosidad por fisuración, debida a fracturas, diaclasas y discontinuidades presentes en las formaciones rocosas favorecen la permeabilidad y con ello la propagación del radón. Pero es difícil relacionar esta variable con el aumento de nivel de radón en las viviendas. Algunos estudios incluyen este factor junto con el de peligrosidad sísmica para realizar mapas predictivos del radón, pero salvo escasos ejemplos ([González-Díez et al. 2009](#)), no se ha observado correlaciones significativas de manera categórica ([García et al., 2013a](#)).

El análisis espacial de esta variable se realiza a partir de la presencia de fallas teniendo en consideración una banda de influencia de 200 m alrededor de las mismas, pues es aproximadamente en este área en donde se puede manifestar una mayor presencia del ²²²Rn ([Rengifo, M et al., 2015](#)). A partir de este radio de acción se generó el mapa de probabilidad de presencia de fallas siguiendo una metodología análoga a la utilizada para la cartografía de zonas uraníferas (figura 27).

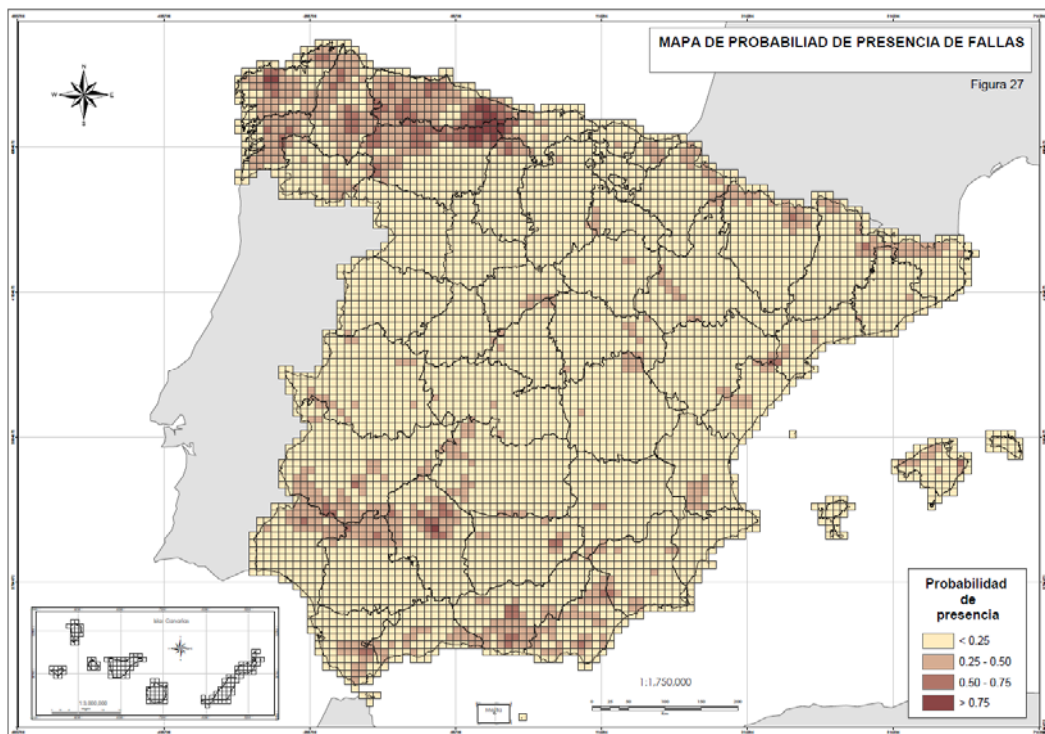


Figura 27: Mapa de probabilidad de presencia de fallas.

La correlación entre concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de fallas se realiza a través de una nube de puntos (figura 28), mostrando una correlación prácticamente nula de R de 0.08

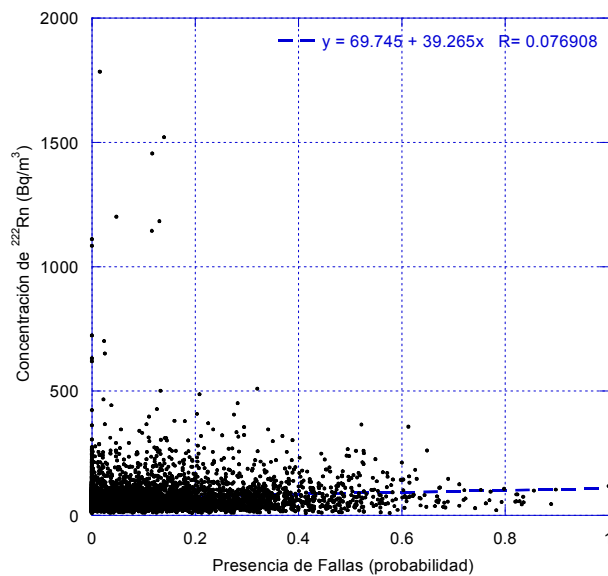


Figura 28: Correlación entre concentración de ^{222}Rn y presencia de fallas

La correlación entre concentraciones de radón y presencias de fallas presenta una baja tendencia positiva. Esta se comprueba analizando para cada rango de concentración de ^{222}Rn la probabilidad media de encontrar fallas (tabla 20):

	Presencia de Fallas		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	10%	14%	16%

Tabla 20: Probabilidad media de presencia de fallas según rangos de concentración de ^{222}Rn .

En el análisis de las concentraciones de radón obtenidas de manera directa en el radio de influencia de 200 m alrededor de las fallas (tabla 21) se comprueba que el rango de valores es muy variable (de 10 a 2065 Bq/m³) siendo la media aritmética ligeramente superior a la media nacional (113 Bq/m³).

	Concentración de ^{222}Rn dentro de los 200m		Concentración de ^{222}Rn fuera de los 200m	
	Nº Datos	%	Nº Datos	%
Media Aritmética ^{222}Rn (Bq/m ³)	113 Bq/m ³		100 Bq/m ³	
>300	22	5	529	5
100-300	131	30	2347	23
<100	286	65	7582	72

Tabla 21: Concentración de ^{222}Rn y presencia de fallas.

En definitiva, la presencia de fallas podría estar relacionada con niveles elevados de radón, pero con estos resultados no se puede asegurar que exista una relación directa y clara entre altas concentraciones y presencia de fallas. Para comprobar esta tendencia, sería necesario disponer de un mayor número de medidas en estas franjas de influencia que permitieran determinar la relación entre ambas variables con más rigor. No obstante, la mayor limitación proviene del inventario de fallas utilizado en este trabajo (y, en general, de los inventarios de los mapas geológicos) que incluyen contactos mecánicos (fallas), tanto activos como relictos, estructuras superficiales y profundas, etc. Es decir, aunque la variable en sí puede ser condicionante, la forma como está representada no es la adecuada para este tipo de estudios.

5

PRESENCIA DE MATERIALES ARCILLOSOS

La importancia del análisis de la presencia de materiales arcillosos se fundamenta en su extremadamente baja permeabilidad y por tanto, en su acción como barrera al transporte de gas radón a través del suelo hacia las viviendas. El estudio de esta variable se realizó a partir del mapa de probabilidad de presencia de materiales arcillosos (figura 29).

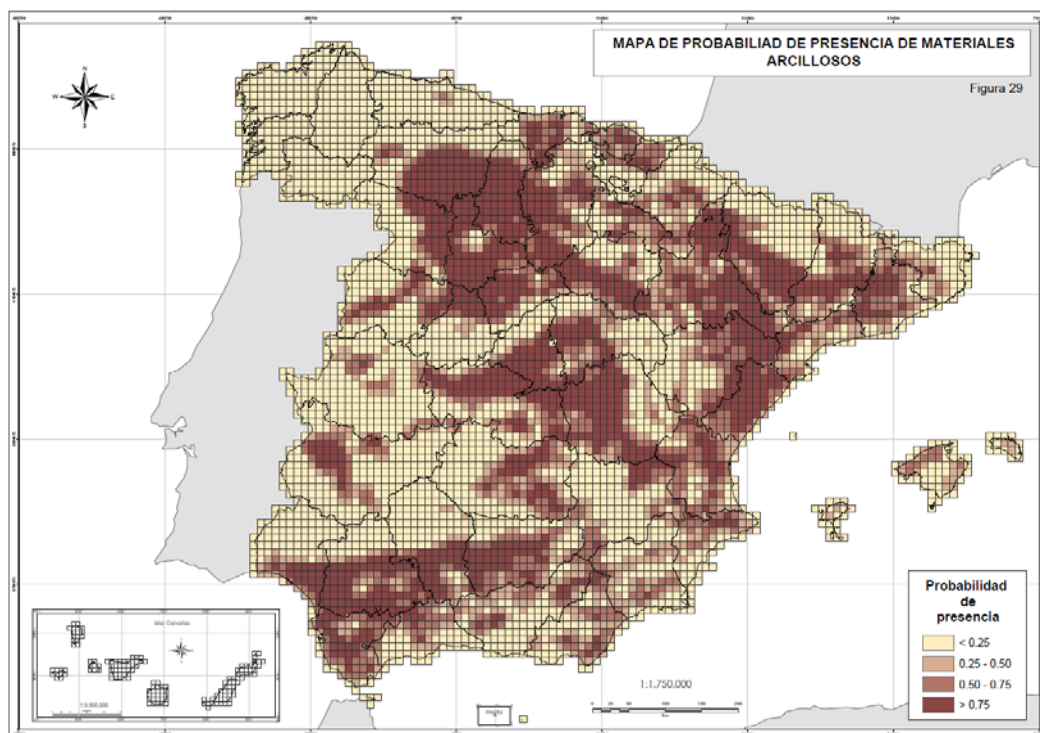


Figura 29: Mapa de probabilidad de presencia de materiales arcillosos.

La vinculación entre concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de materiales arcillosos se observa en la figura 30.

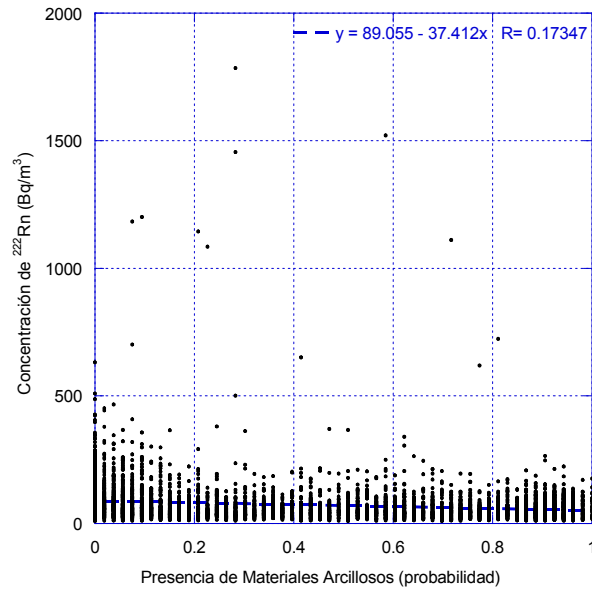


Figura 30: Correlación entre concentración de ²²²Rn y presencia de materiales arcillosos.

Su correlación de R de 0.17, con una tendencia negativa, lo cual da a entender que cuanto mayor sea la presencia de materiales arcillosos cabe esperar una menor probabilidad de encontrar altas concentraciones de ²²²Rn.

Esta tendencia negativa se comprueba analizando para cada rango de concentración de radón la probabilidad media de encontrar materiales arcillosos (tabla 22). Se observa que la presencia de materiales arcillosos aumenta a medida que se reducen las concentraciones de radón.

	Presencia de Materiales Arcillosos		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	43%	26%	16%

Tabla 22: Probabilidad media de presencia de materiales arcillosos según rangos de concentración de ²²²Rn.

En el estudio de las concentraciones de radón obtenidas a partir de los datos puntuales se ven claras diferencias entre las concentraciones de radón obtenidas sobre materiales arcillosos y las que no se encuentran sobre estos terrenos (ver tabla 23).

	Concentración de ^{222}Rn en materiales arcillosos		Concentración de ^{222}Rn en materiales no arcillosos	
	Nº Datos	%	Nº Datos	%
Media Aritmética ^{222}Rn (Bq/m^3)	75 Bq/m^3		117 Bq/m^3	
Concentración ^{222}Rn (Bq/m^3)				
>300	93	2	437	7
100-300	725	17	1677	26
<100	3415	81	4240	67

Tabla 23: Concentración de ^{222}Rn y presencia de materiales arcillosos

Las concentraciones medidas de radón sobre materiales arcillosos son inferiores a la media nacional ($75 \text{ Bq}/\text{m}^3$), mientras que en el caso de las medidas realizadas sobre materiales no arcillosos son similares a la media nacional. El 81% de las medidas realizadas sobre estos materiales presentan concentraciones inferiores a los $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$, siendo representativo que la mitad de éstas se encuentren por debajo de los $50 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

A partir de los datos obtenidos se intuye que estas formaciones arcillosas superficiales son áreas donde es probable encontrar bajas concentraciones de radón debido principalmente a que la escasa permeabilidad de este tipo de materiales permite una escasa difusión del ^{222}Rn . Además, estas áreas arcillosas suelen estar saturadas en agua lo que reduce aún más la permeabilidad.

Estos resultados se han basado en el estudio del Mapa predictor de riesgo por expansividad de arcillas de España a escala 1/1,000,000 del IGME. Para la escala de análisis estatal a la que se ha realizado el presente trabajo puede ser de utilidad en la identificación de zonas con probabilidad de bajas concentraciones de ^{222}Rn . Dentro de estos materiales arcillosos aparecen formaciones que pueden contener concentraciones de uranio o incluso radio significativas, por ello si se quiere realizar un estudio a mayor escala será necesario analizar las unidades litológicas con más detalle y/o en combinación con el mapa geológico-litológico convencional.

6

PRESENCIA DE MATERIALES DEL CUATERNARIO

Los materiales cuaternarios pueden tener un alto contenido en arcillas, por lo que del mismo modo que en el caso anterior la presencia de radón sobre estos materiales estaría vinculada a la escasa permeabilidad de algunos materiales cuaternarios. Existe una gran variabilidad de materiales incluidos dentro de esta categoría, tanto impermeables como muy permeables y pudiendo presentar en algunos casos altas concentraciones de uranio por proceder de rocas graníticas o meta sedimentarias.

De nuevo, en el estudio de esta variable se empleó un mapa de probabilidad de presencia de materiales cuaternarios (figura 31).

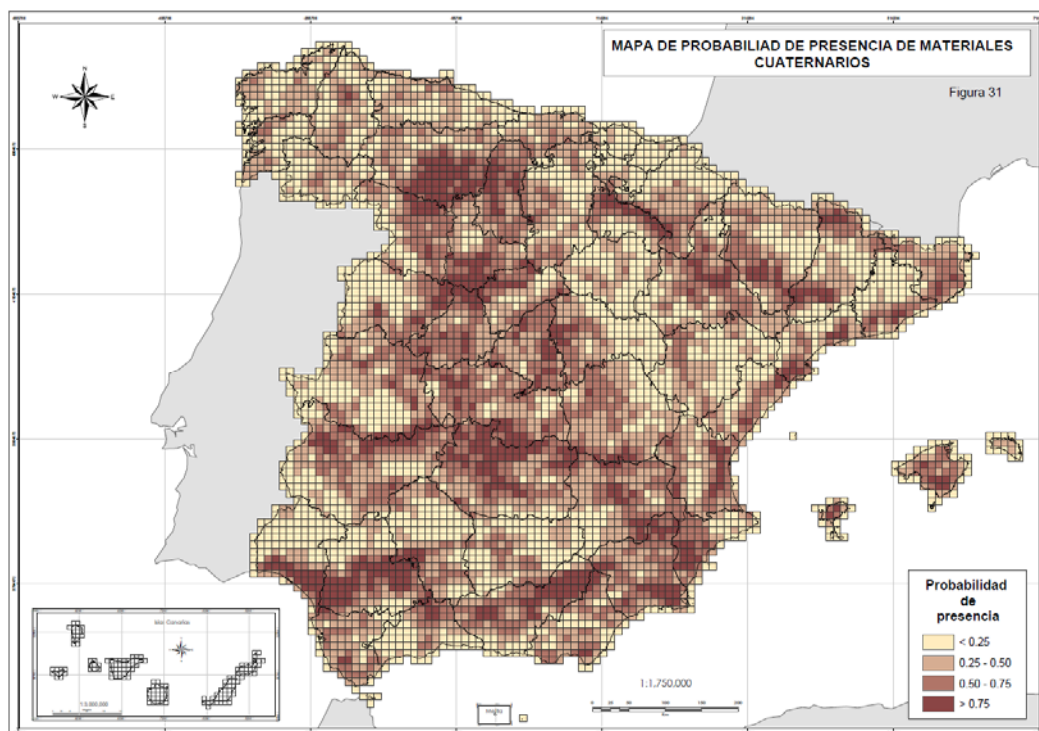


Figura 31: Mapa de probabilidad de presencia de materiales del cuaternario.

La vinculación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de materiales cuaternarios se observa en la figura 32 indicando una correlación de R de 0.09.

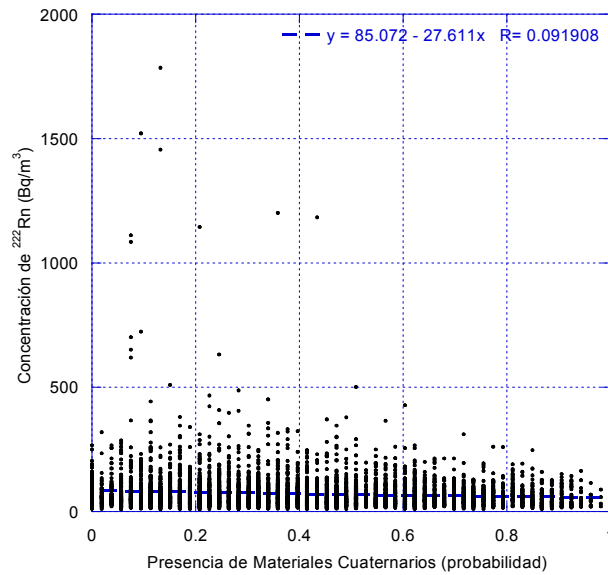


Figura 32: Correlación entre concentración de ²²²Rn y presencia de materiales cuaternarios

Su tendencia es negativa, pero debido a la prácticamente nula correlación encontrada se analizó esta variable según su probabilidad de presencia en los diferentes rangos de concentración de radón (tabla 24)

	Presencia de Materiales Cuaternarios		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	0.40	0.37	0.26

Tabla 24: Probabilidad media de presencia de materiales cuaternarios según rangos de concentración de ²²²Rn

También se observa una tendencia negativa en donde a mayor presencia de materiales del cuaternario existe una menor probabilidad de encontrar altas concentraciones de ²²²Rn.

Este hecho se comprueba al estudiar las concentraciones de radón obtenidas de manera directa sobre estos materiales (tabla 25). La mayor parte (el 74%) de las medidas realizadas sobre zonas cuaternarias presentan concentraciones inferiores a los 100 Bq/m³, siendo su media (93 Bq/m³) inferior a la media nacional, debido principalmente a que estos datos presentan una amplia dispersión, con concentraciones que oscilan entre 10 Bq/m³ y 7400 Bq/m³.

	Concentración de ^{222}Rn en materiales cuaternarios		Concentración de ^{222}Rn en materiales no cuaternarios	
	Media Aritmética ^{222}Rn (Bq/m ³)	93 Bq/m ³		109 Bq/m ³
Concentración ^{222}Rn (Bq/m ³)	Nº Datos	%	Nº Datos	%
>300	257	5	271	6
100-300	1201	21	1164	24
<100	4239	74	3423	71

Tabla 25: Concentración de ^{222}Rn y presencia de materiales del cuaternario

Del mismo modo, en el análisis de las medidas realizadas en localidades que no se encontraban sobre materiales del cuaternario también se observa un elevado número de medidas en las bajas concentraciones, pero la concentración media de ^{222}Rn es ligeramente superior (109 Bq/m³) a los datos obtenidos en zonas cuaternarias

Con estos resultados se puede indicar que existe cierta tendencia a encontrar bajas concentraciones de ^{222}Rn en las zonas delimitadas como cuaternarias, pero no se puede corroborar que exista una clara diferenciación entre las posibles concentraciones de ^{222}Rn obtenidas sobre terrenos del cuaternario y no cuaternarios. Este hecho es debido como se ha comentado anteriormente, a que el IGME dentro de los materiales del cuaternario incluye una gran amplitud de depósitos datados en 10 intervalos geocronológicos en función de su génesis (glaciar, volcánica, kárstica, eólica, litoral, edáfica, paleontológica y prehistórica).

Con estos resultados se puede indicar que existe cierta tendencia a encontrar bajas concentraciones de ^{222}Rn en las zonas clasificadas como cuaternarias, pero no se puede corroborar que exista una clara diferenciación entre las posibles concentraciones de ^{222}Rn obtenidas sobre terrenos del cuaternario y no cuaternarios. Este hecho es debido a las limitaciones del mapa original, como se ha comentado anteriormente. El IGME dentro de los materiales del cuaternario incluye una gran variedad de depósitos en función de su génesis (glaciar, volcánica, kárstica, eólica, litoral, edáfica, paleontológica y prehistórica) y su cronología. Sin embargo, en esta clasificación se incluyen sedimentos de muy diferente naturaleza, desde fundamentalmente arcillosos (muy impermeables), hasta conglomerados clastosoportados (muy permeables), pasando por todo tipo de sedimentos detríticos, de composición y textura muy diversa. Análogamente, dentro de la clase de materiales del cuaternario se incluyen indiscriminadamente materiales cuyos sedimentos proceden de cualquier roca previa, rica o pobre en uranio. Como consecuencia de

ambos aspectos, los materiales clasificados como cuaternarios presentan concentraciones de radón tan dispares.

Para refinar los resultados obtenidos, sería por lo tanto necesario realizar un estudio pormenorizado de estos materiales, diferenciando los depósitos según su contenido en arcilla y su procedencia. Además, incremento del número de medidas en estas zonas se podría diferenciar mejor, a escala de mayor detalle, los materiales cuaternarios con una mayor probabilidad de presentar altas concentraciones de radón. En todo caso, la distribución de materiales arcillosos constituye, en principio, una variable más condicionante y con menos limitaciones que la presencia de materiales del cuaternario, a la hora de explicar la concentración de radón en el terreno.

7

PRESENCIA DE FORMACIONES KÁRSTICAS

La presencia de radón sobre formaciones kársticas también está relacionada con la permeabilidad de este tipo de formaciones, como consecuencia de su porosidad característica.

Numerosas litologías como las calizas y dolomías suelen presentar karstificación, lo que confiere a estas rocas una alta porosidad. Estas rocas poseen una baja porosidad intergranular cuando no están karstificadas, por lo que en un principio presentan baja permeabilidad, pero cuando están karstificadas son mucho más permeables. Sin embargo y como consecuencia de estos procesos de disolución kársticos se generan arcillas residuales de decalcificación (muy impermeables) que puede cubrir, al menos en parte, la roca karstificada, sellando la porosidad que presentaba en las fisuras. Esta cobertura arcillosa se produce especialmente en las depresiones y fondos de valle, lugares en los que se sitúan las viviendas en las que se han recogido mayoritariamente las muestras.

Para estudiar esta variable se ha realizado un mapa de probabilidad de presencia de formaciones kársticas como el que se presenta en la figura 33.

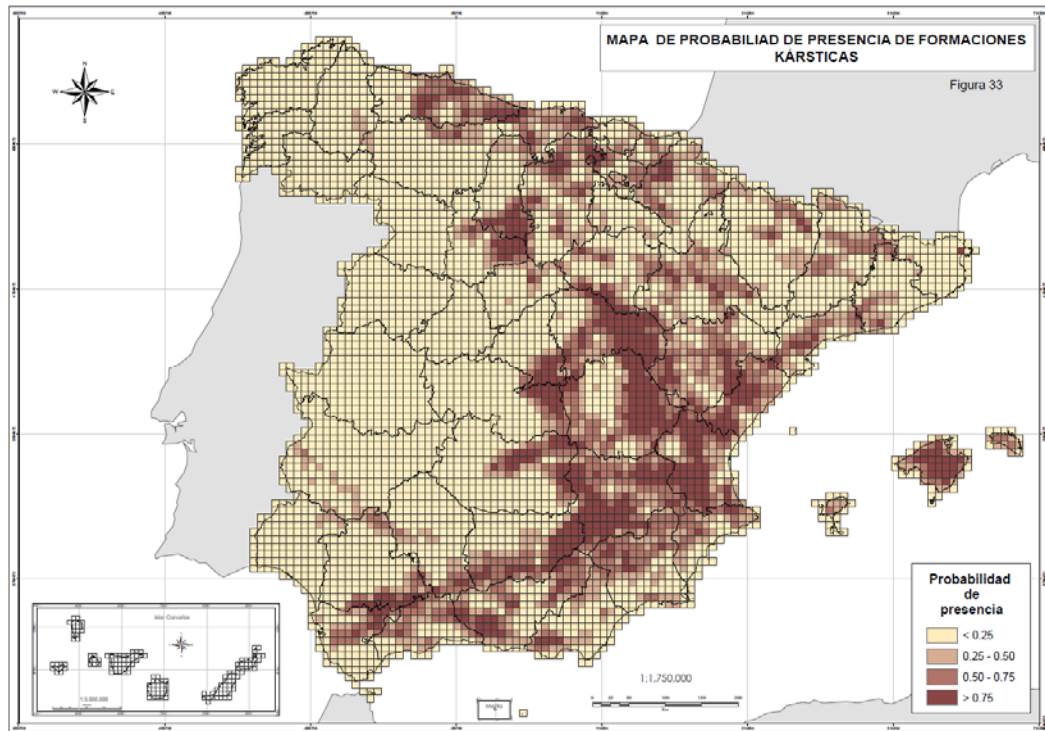


Figura 33: Mapa de probabilidad de presencia de formaciones kársticas.

La representación de las concentraciones de radón frente a la probabilidad de presencia de formaciones kársticas muestra (figura 34) una correlación con un coeficiente R de 0.21 con tendencia negativa.

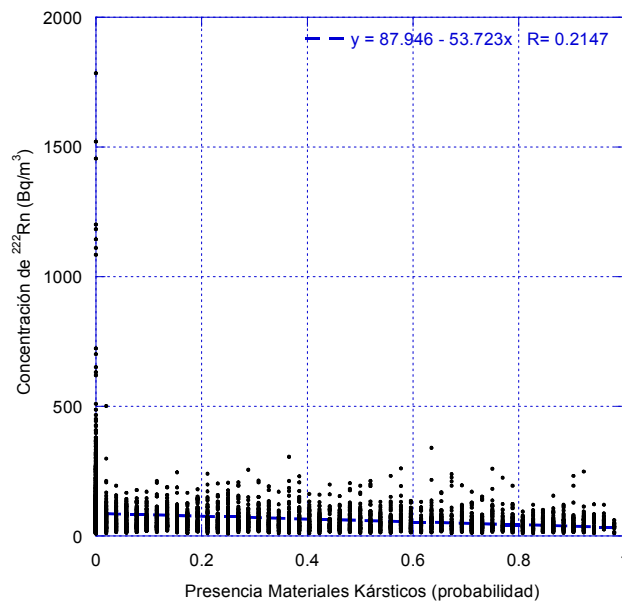


Figura 34: Correlación entre concentración de ^{222}Rn y presencia de formaciones kársticas.

La tabla 26 parece corroborar esta tendencia, mostrando el porcentaje de formaciones kársticas según los rangos de concentración de ^{222}Rn .

	Presencia de formaciones kársticas		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	29%	13%	0,2%

Tabla 26: Probabilidad media de presencia de formaciones kársticas según rangos de concentración de ^{222}Rn .

En el estudio de las concentraciones de ^{222}Rn obtenidas de manera directa (tabla 27) se refleja una clara diferencia en las concentraciones de radón obtenidas sobre formaciones kársticas y las que no se encuentran sobre estos terrenos: La concentración media en formaciones kársticas (68 Bq/m³) es muy inferior a la media nacional encontrándose la gran mayoría de las medidas en concentraciones inferiores a los 50 Bq/m³.

	Concentración de ^{222}Rn en formaciones kársticas		Concentración de ^{222}Rn en formaciones no kársticas	
	Nº Datos	%	Nº Datos	%
Media Aritmética ^{222}Rn (Bq/m ³)	68 Bq/m ³		105 Bq/m ³	
>300	29	2	501	5
100-300	187	14	2190	24
<100	1145	84	6525	71

Tabla 27: Concentración de ^{222}Rn y presencia de formaciones kársticas.

Respecto a las medidas realizadas en localidades que no se encuentran sobre formaciones kársticas, se observa que sus concentraciones se encuentran en torno a la media nacional, siendo superiores a las mediciones realizadas en formaciones kársticas.

Aunque con un coeficiente de correlación muy débil, parece que a esta escala de análisis este tipo de formaciones no favorece la difusión de ^{222}Rn . Esto probablemente se debe a la combinación de dos factores: las zonas karstificadas se encuentran asociadas a rocas calizas y dolomías, compuestas por minerales (fundamentalmente calcita y dolomita) con escaso contenido en uranio; por otro lado, el muestreo se ha realizado fundamentalmente en los fondos de valle, constituidos por arcillas de

decalcificación muy impermeables. Ambos factores favorecen la presencia de bajas concentraciones de radón.

Pero no siempre se asocia un bajo contenido en uranio con unas bajas concentraciones de radón, pues en el caso de estas formaciones se debe de tener en cuenta la porosidad para explicar el proceso de difusión del ^{222}Rn .

Estas rocas poseen una baja porosidad intergranular, por lo que en un principio presentan baja permeabilidad. La permeabilidad asociada a este tipo de formaciones viene asociada su fisuración: cuando están karstificadas son mucho más permeables, pero los suelos residuales que producen son por lo general muy arcillosos y pueden sellar las fisuras.

Actualmente no existen estudios detallados relacionados con la presencia de radón y karst a pesar de que representa un porcentaje significativo (22%) de la geografía española. Para estudiar esta variable más en profundidad es necesario aumentar el número de medidas en estas zonas kársticas, diferenciando las diferentes formaciones (carbonatadas, dolomíticas, arcillas de decalcificación y unidades yesíferas), pues dentro de estas tipologías aparecen litologías como ciertos tipos de yesos o mármoles que pueden originar concentraciones elevadas de ^{222}Rn .

8

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS A ESCALA 1:200,000

Como se ha citado anteriormente, la fuente de producción natural de radón es la presencia de ^{226}Ra en los suelos y rocas. La geología de una zona hace que la concentración de radón en una vivienda pueda ser elevada por el simple hecho de asentarse sobre formaciones geológicas que presenten altas concentraciones de este isótopo.

Adicionalmente, la facilidad con la que el radón pueda moverse a través de los poros del suelo dependerá en gran medida de la permeabilidad del terreno y por lo tanto de las propias características de suelos y rocas. Esta permeabilidad es uno de los principales factores que favorecen la difusión del ^{222}Rn al interior de las edificaciones, tal y como se ha comentado. Los datos de permeabilidad reflejados en estos resultados se encuentran asignados a cada unidad litoestratigráfica, por lo tanto reflejan los valores de permeabilidad en relación con su dominio hidrogeológico. Estos

valores proporcionados por el IGME son indicativos de la capacidad hidrogeológica (permeabilidad acuífero) del substrato y no reflejan la permeabilidad de los primeros metros de suelo (formación superficial), que son los que mayor relevancia tienen en cuanto a la explicación del transporte del gas radón y por tanto de la presencia de éste en los interiores de las edificaciones.

La siguiente figura 35 representa el poder emisor de las unidades litoestratigráficas de la península ibérica, a partir de la composición mineral de los distintos tipos de roca (criterio petrológico) basándose en la tabla 1 definida en el capítulo 2.2.3: Factores geológicos: presencia de ^{226}Ra en la roca o suelo, siendo el suelo (formación superficial) un material residual originado a partir de la roca madre que ocupa la parte superior del terreno.

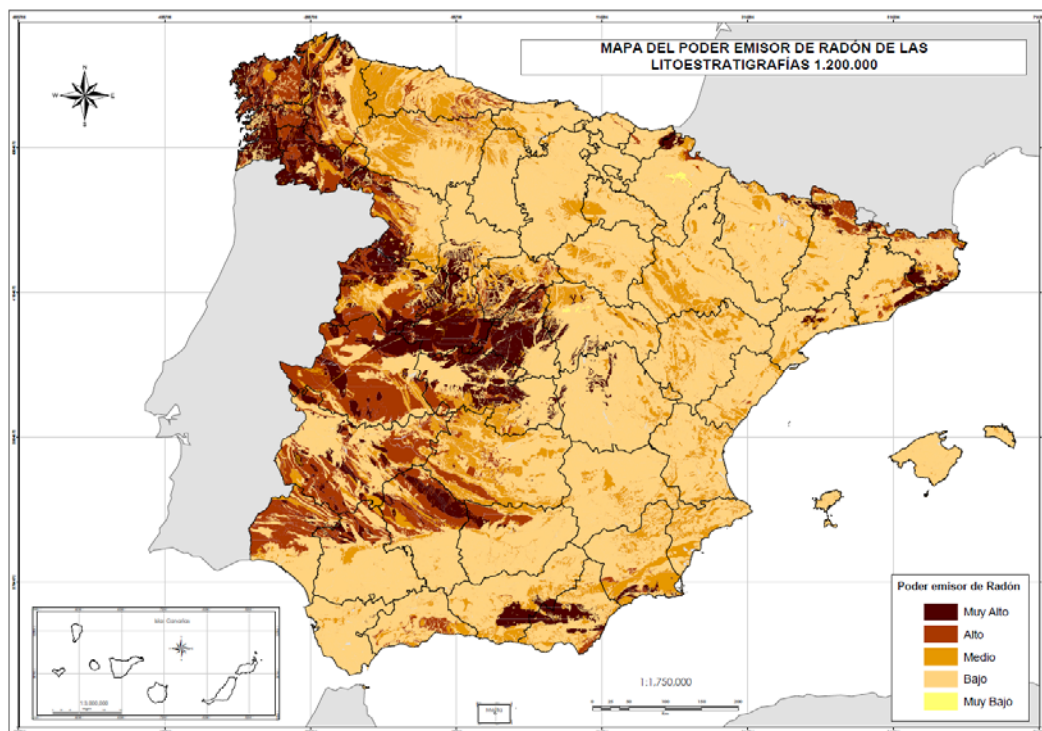


Figura 35: Estimación del poder emisor de radón de las unidades litoestratigráficas 1:200,000

Las unidades se han clasificado en cinco tipos atendiendo a su mayor o menor poder de emisión: Se observa que las unidades litoestratigráficas con mayor poder emisor de radón son las formaciones correspondientes al dominio predominantemente silíceo (Macizo Varisco Ibérico). En cambio, las litoestratigrafías con un menor poder emisor son las asociadas a los dominios calcáreos y arcillosos (cadenas alpinas y cuencas continentales).

En los siguientes apartados se reflejan los resultados obtenidos del estudio de las principales características de las unidades litoestratigráficas presentes en la península.

8.1 ORIGEN PETROLÓGICO DE LAS UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS

Existen diferentes procesos geológicos petrogenéticos, como son los procesos magmáticos, sedimentarios y metamórficos que dan origen a diferentes rocas y que determinan las unidades litoestratigráficas definidas.

Cada uno de estos orígenes (tipos petrológicos según la clasificación del IGME) tiene una mayor o menor representatividad en el total de la superficie de la península ibérica (tabla 28). Las rocas detríticas, meta detríticas (rocas metamórficas de origen detrítico), carbonatadas y detríticas del cuaternario son las más abundantes. Mientras que las ígneas (intrusivas), evaporíticas y volcánicas apenas tienen presencia en el total de la superficie de la península.

	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Carbonatadas	101301	21
Detríticas	154993	30
Detríticas del Cuaternario	87151	18
Evaporíticas	7130	1
Ígneas	35871	7
Meta Detríticas	104891	22
Volcánicas	3326	1
Sup total P.I	494663	100

Tabla 28: Superficie ocupada por de cada unidad petrológica según su origen (IGME).

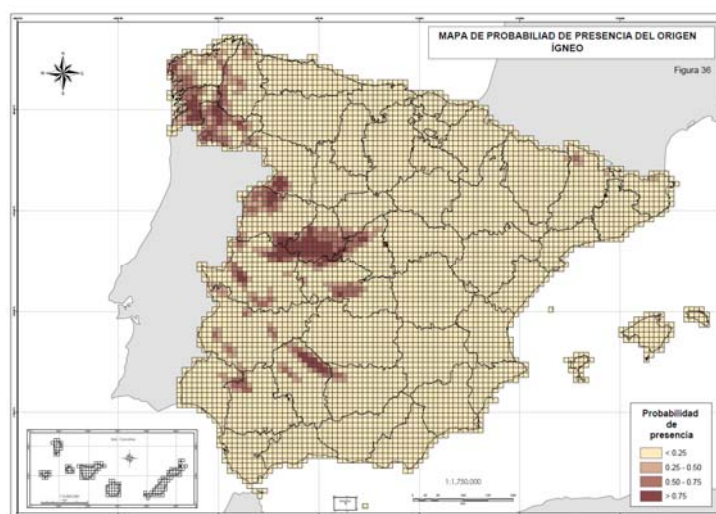
Este hecho tiene importancia a la hora de describir esta variable, pues el porcentaje de medidas de concentración de ²²²Rn realizadas en cada una de las unidades de origen petrológico (densidad de muestreo) fue diferente como se muestra en la Tabla 29.

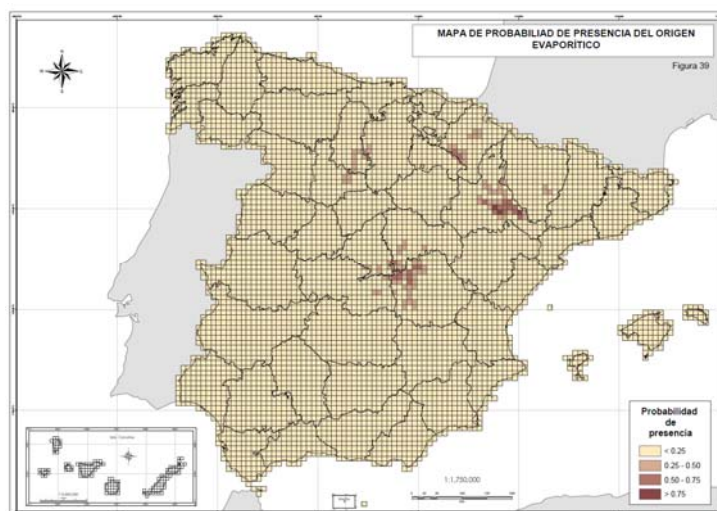
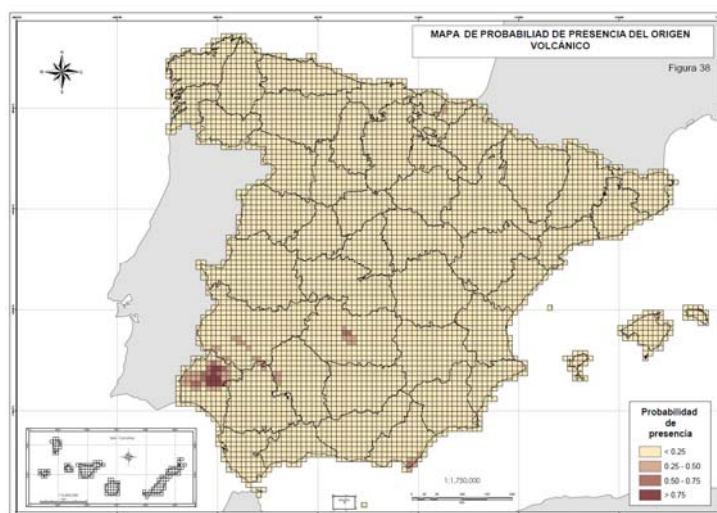
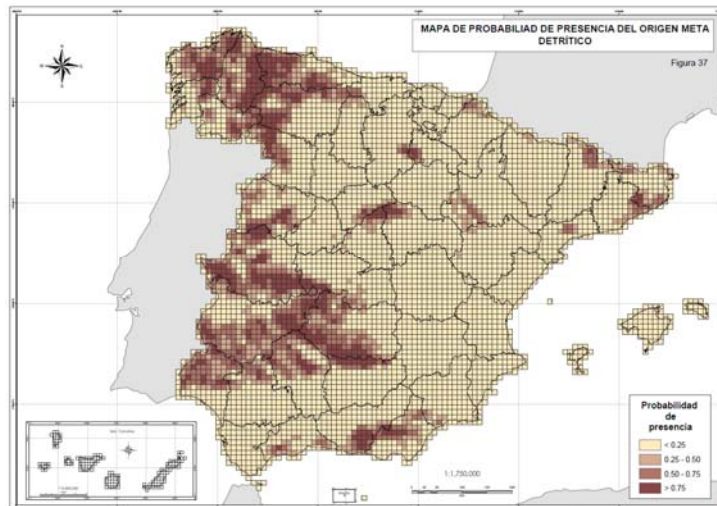
	% de medidas	Densidad de muestreo
Carbonatadas	10 %	0.009
Detríticas	23 %	0.015
Detríticas del Cuaternario	28 %	0.032
Evaporíticas	1 %	0.014
Ígneas	18 %	0.052
Meta Detríticas	19 %	0.018
Volcánicas	1 %	0.026

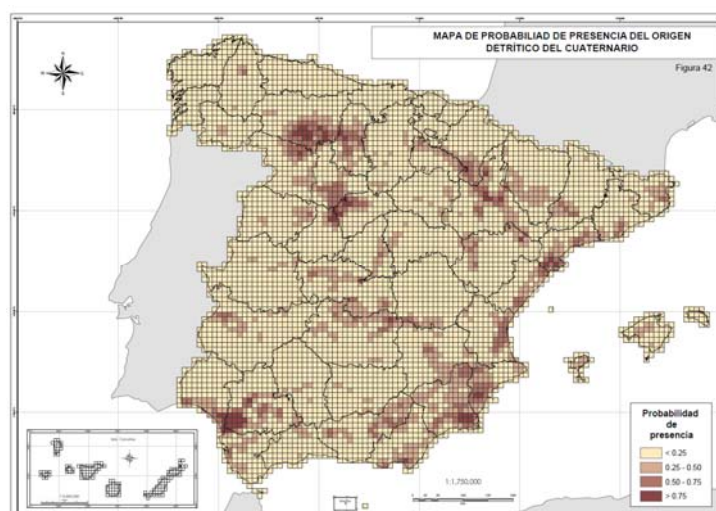
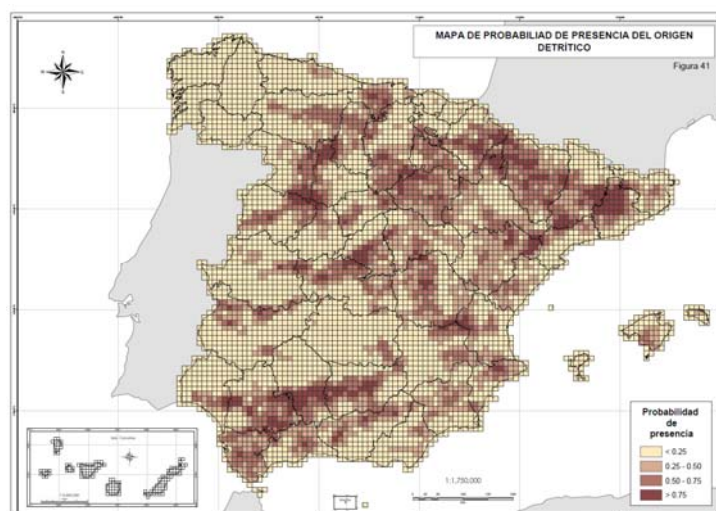
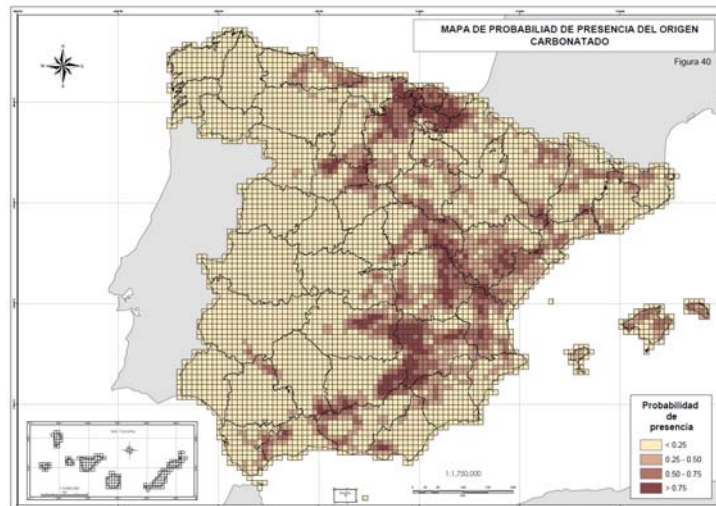
Tabla 29: Densidad de muestreo en cada origen petrológico.

La mayoría de medidas se realizó sobre rocas de tipo detrítico y rocas detríticas del cuaternario (28% y 23% respectivamente). Pero analizando los datos referentes a la densidad de muestreo por origen, se observa que las medidas realizadas sobre rocas ígneas y detríticas del cuaternario fueron las más numerosas. Esto se debe a que el muestreo no fue diseñando de manera aleatoria, pues se forzó la realización de medidas en localidades con una geología previamente señalada. Pese a ello la densidad de muestreo se considera aceptable para realizar el estudio de los diferentes tipos de orígenes petrológicos de las unidades litoestratigraficas.

Una parte del estudio de estos orígenes se realizó a través de los mapas de probabilidad de presencia de cada uno de ellos (figuras 36 a 42)

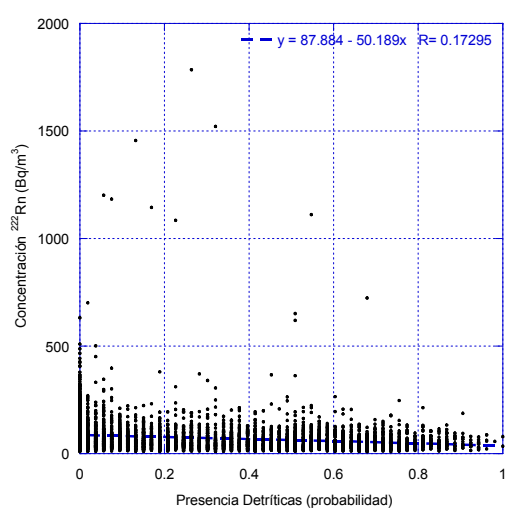
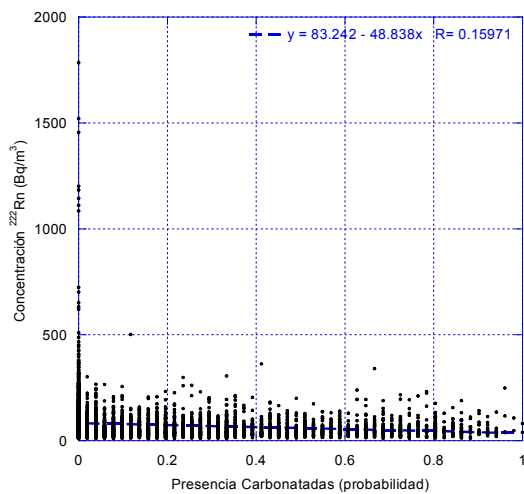
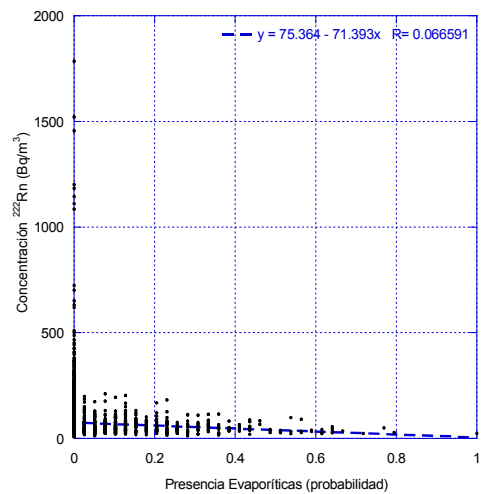
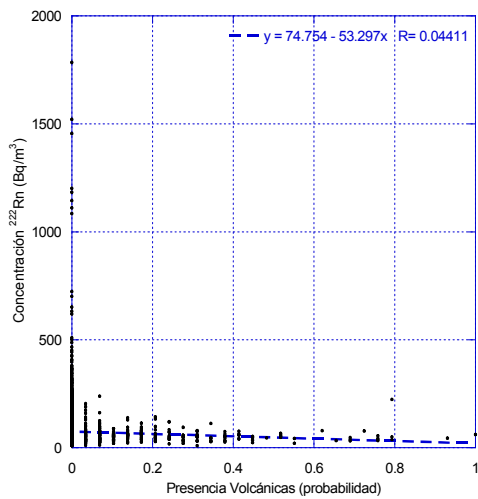
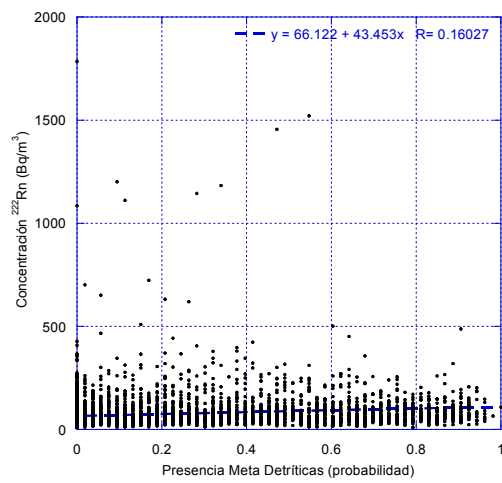
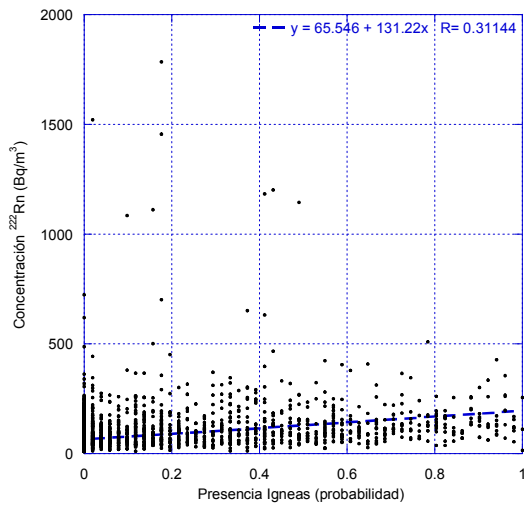


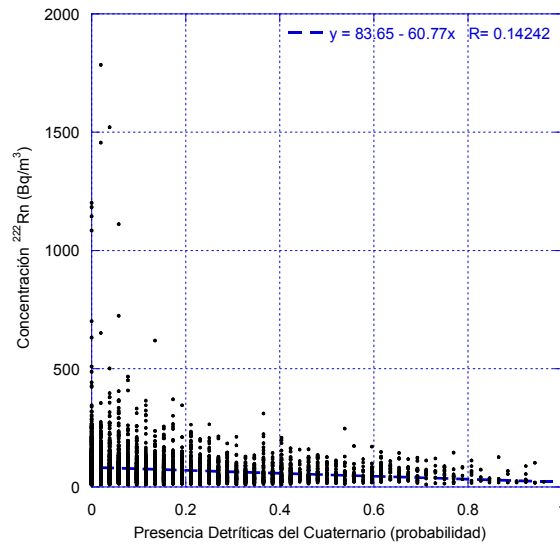




Figuras 36 a 42: Mapas de probabilidad de presencia de cada uno de los orígenes de las unidades litoestratigráficas.

La correlación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de los diferentes orígenes se observa en las figuras 43- 49 y en la tabla 31.





Figuras 43-49: Correlación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de los diferentes orígenes (tipos petrológicos).

Las rocas de origen ígneo y meta detrítico presentan una tendencia positiva con el ^{222}Rn siendo su correlación más fuerte en las rocas ígneas ($R=0.31$) que en el caso de las rocas meta detríticas ($R=0.16$).

Las rocas volcánicas, evaporíticas, carbonatadas, detríticas y detríticas del cuaternario presentan una tendencia negativa con el ^{222}Rn . Las correlaciones más fuertes son en las rocas de origen detrítico ($R=0.17$), carbonatado ($R=0.16$) y detrítico del cuaternario ($R=0.14$).

En las rocas volcánicas y evaporíticas se observa su extremada baja correlación ($R=0.04$ y $R=0.07$) con las concentraciones de radón indicando la ausencia de algún tipo de vinculación.

Para comprobar estas tendencias se analizó la probabilidad media de encontrar los diferentes orígenes según los rangos de concentración de ^{222}Rn (tabla 31).

	Presencia de Orígenes de las Unidades Litoestratigráficas		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%) Ígneas	3%	19%	34%
Probabilidad media (%) Meta Detríticas	16%	28%	27%
Probabilidad media (%) Carbonatadas	21%	11%	3%
Probabilidad media (%) Detríticas	30%	17%	11%
Probabilidad media (%) Detríticas del	17%	11%	6%
Probabilidad media (%) Volcánicas	1%	0.3%	0%
Probabilidad media (%) Evaporíticas	2%	0.6%	0%

Tabla 31: Probabilidad media de presencia de orígenes según rangos de concentración de ²²²Rn.

Se comprueba que existe una mayor probabilidad de encontrar altas concentraciones de ²²²Rn en las áreas donde hay una mayor presencia de rocas de origen ígneo (34% de probabilidad) y meta detrítico (27% de probabilidad). Este tipo de rocas se relacionan con la presencia de radón, sobre todo porque son rocas ácidas, caracterizadas por estar compuestas por minerales relativamente ricos en uranio.

En sentido contrario, aparecen las rocas de origen detrítico, carbonatado y detrítico del cuaternario, las cuales tienen una mayor presencia en las bajas concentraciones. De manera general, la presencia de este tipo de rocas no está relacionada con la presencia de radón. Como ya se ha mencionado anteriormente, las rocas carbonatas son pobres en uranio y las de origen detrítico suelen ser poco permeables, lo que explicaría en gran parte la escasa concentración en radón de estos materiales. Obviamente, existen algunas excepciones. Así, hay un 11% de probabilidad de encontrar altas concentraciones (100-300 Bq/m³) de radón en rocas detríticas. En este caso sucedo como con la variable materiales del cuaternario: existe una gran variedad de materiales incluidos dentro de esta categoría, algunos de ellos como los procedentes de rocas graníticas o meta sedimentarios pueden presentar altas concentraciones de radón.

Las rocas volcánicas y evaporíticas tienen cierta tendencia a estar presentes en las bajas concentraciones, no encontrándose relación con la presencia de radón. No obstante, en algunas zonas muy concretas las concentraciones son elevadas, como por ejemplo en los emplazamientos de rocas volcánicas ácidas (ricas en sílice) y de rocas evaporíticas asociadas a vulcanismo.

La comprobación de estos resultados viene dada mediante el análisis de estos orígenes petrológicos a partir de las medidas directas de concentración de ^{222}Rn .

La estadística de las concentraciones de radón obtenidas en cada uno de los orígenes se muestra en la tabla 32.

	Carbonatadas	Detríticas	Detríticas	Evaporíticas	Ígneas	Metadetríticas	Volcánicas
% de	10	23	28	1	18	19	1
M.A	65	64	69	70	152	119	54
D.s M.A	61.8	71.3	75.3	76.1	182.4	183.3	38.5
M.G(Bq/m ³)	62	60	66	67	140	107	52
D.s M.G	60.2	68.8	71.9	76.0	145.5	142.2	37.7

Tabla 32: Estadística de la concentración de ^{222}Rn en cada origen petrológico.

Las mayores concentraciones de ^{222}Rn aparecen sobre unidades litoestratigráficas de origen ígneo y metamórfico. En ambos casos se supera la media nacional, situándose en 152 Bq/m³ en el caso de las rocas ígneas y 119 Bq/m³ en las rocas meta detríticas. Es de señalar que la desviación estándar de estas rocas es muy superior al resto de las litoestratigrafías analizadas, esto se debe a la gran variabilidad de las concentraciones encontradas en este tipo de rocas. Respecto al resto de los orígenes, sus concentraciones se encuentran por debajo de la media nacional. Todas ellas poseen una media aritmética y una desviación estándar similar.

Respecto al resto de los orígenes, sus concentraciones se encuentran por debajo de la media nacional. Todas ellas poseen una media aritmética y una desviación estándar similar.

La tabla 33 muestra el número de medidas realizadas por rangos de concentración, atendiendo al origen petrológico de las unidades litoestratigráficas:

	Concentración de ^{222}Rn por Orígenes de las Litoestratigrafías		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Ígneas	977 (49%)	789 (40%)	212 (11%)
Meta Detríticas	1289 (64%)	557 (28%)	173 (9%)
Carbonatadas	827 (83%)	157 (16%)	17 (2%)
Detríticas	1996 (83%)	391 (16%)	48 (2%)
Detríticas del Cuaternario	2385 (81%)	491 (17%)	81 (3%)
Volcánicas	77 (86%)	11 (12%)	1 (1%)
Evaporíticas	87 (83%)	15 (14%)	3 (3%)

Tabla 33: Número de medidas realizadas por rangos de concentración de ^{222}Rn .

La representación gráfica (figura 50) de estas concentraciones por origen petrológico permite comprobar de manera más clara los resultados anteriormente descritos:

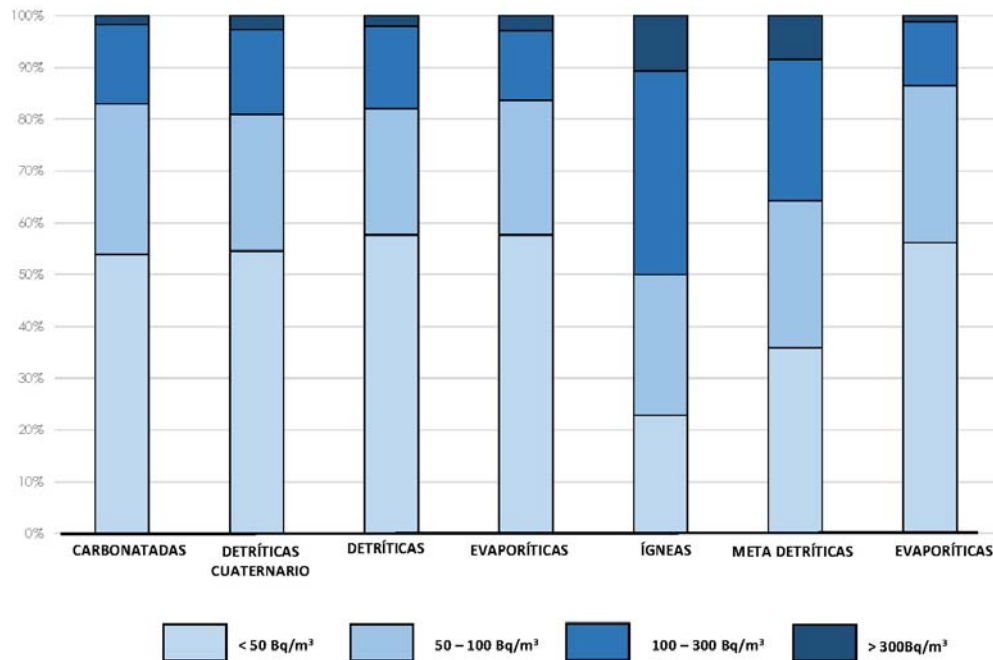


Figura 50: Concentración de ^{222}Rn en cada origen petrológico.

Como se puede observar en la figura, se superan los 100 Bq/m^3 en más de la mitad de las medidas realizadas sobre las rocas ígneas y en un tercio de las rocas meta detríticas. Un dato a resaltar es que se superan los 300 Bq/m^3 en el 11% de las medidas realizadas sobre el origen ígneo y en el 9% sobre las rocas meta detríticas. En cambio, en el resto de los orígenes predominan las bajas concentraciones (por encima del 80% de las medidas realizadas).

A partir de estos datos se puede señalar una clara división de orígenes petrológicos con presencia en las altas concentraciones (ígneo y meta detrítico) y otro que no presentan tal relación (carbonatado, detrítico y detrítico del cuaternario).

Al analizar la distribución de las concentraciones de ^{222}Rn para cada origen petrológico, se comprueba que las rocas carbonatadas, detríticas, detríticas del cuaternario y evaporíticas muestran un comportamiento similar (figura 51),

caracterizado por un predominio de las bajas concentraciones y por el hecho de que las concentraciones más elevadas (>300 Bq/m³) no superan el 5% de las medidas realizadas.

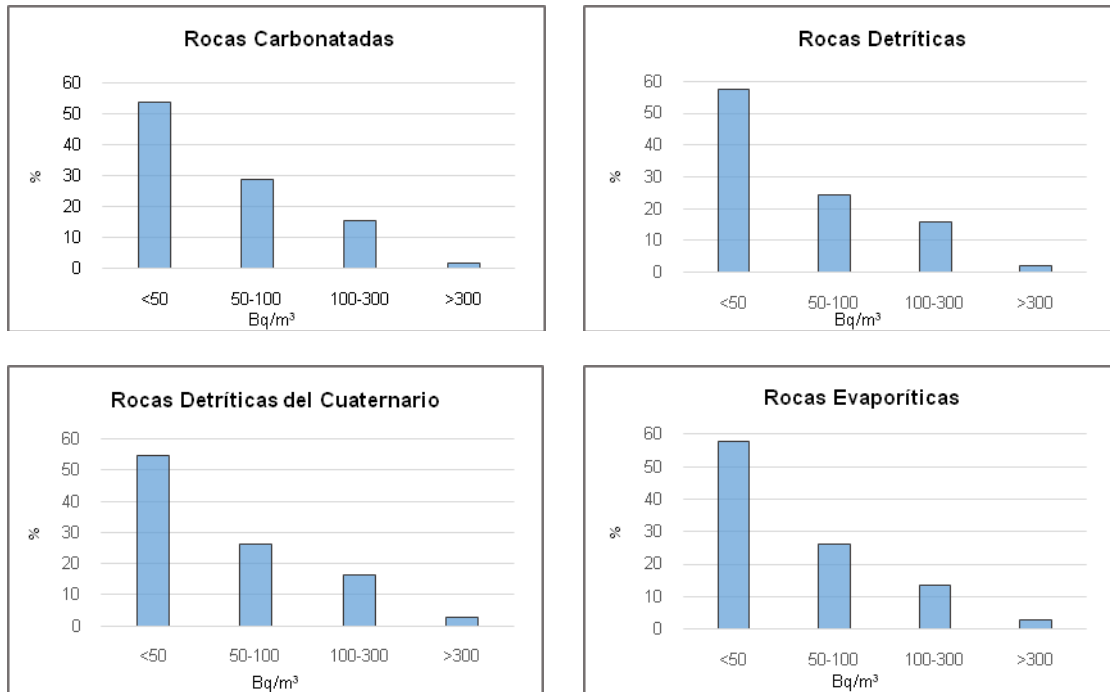


Figura 51: Distribución de los datos de concentración de rocas carbonatadas, detríticas, detríticas del cuaternario y evaporitas.

En cuanto a las rocas ígneas, meta detríticas y volcánicas, las concentraciones predominantes son las medias-altas (100-300 Bq/m³) superando los 300 Bq/m³ el 10% de los datos analizados (figura 52).

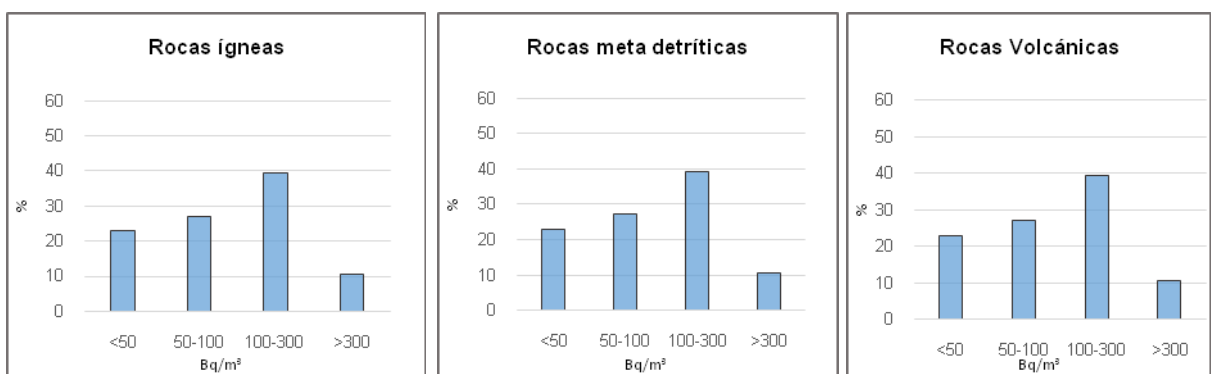


Figura 52: Distribución de los datos de concentración de rocas ígneas, meta detríticas y volcánicas

Esta clara división en dos grandes grupos puede ser explicada fundamentalmente por la petrología y composición mineralógica de las rocas. La permeabilidad asociada a cada una de las diferentes unidades litoestratigáficas clasificadas según su origen petrológico solo puede matizar lo anterior.

De forma individualizada, cada unidad litoestratigráfica tiene asociada un origen petrológico (ígneo, meta detrítico, volcánico, evaporítico, detrítico o detrítico del cuaternario) y un rango de permeabilidad (muy alto, alto, medio, bajo o muy bajo). Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, el sentido de esta permeabilidad es el de la roca del substrato y se ha definido por el IGME considerando su calidad como acuífero (capacidad para almacenar y transmitir agua). Por lo tanto, no se refiere a la permeabilidad de las formaciones superficiales para describir la facilidad con la que el radón puede circular.

Para analizar la influencia de la permeabilidad del substrato en función de los orígenes petrológicos, así como la media de concentración de ^{222}Rn obtenida para cada tipo de origen y permeabilidad se han confeccionado las tablas 34 y 35.

	Permeabilidad (% de medidas realizadas)				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Carbonatadas	12%	18 %	33 %	24 %	13 %
Detríticas	12 %	35 %	50 %	2 %	1 %
Detríticas del Cuaternario	1 %	4 %	28 %	20 %	47 %
Evaporíticas	27 %	68 %	5 %		
Ígneas		100 %			
Meta Detríticas	12 %	86 %	1 %	1 %	
Volcánicas	18 %	75 %		7 %	

Tabla 34: Permeabilidades predominantes en cada uno de los orígenes petrológicos.

Más del 65% de las medidas realizadas sobre rocas ígneas, meta detríticas, volcánicas y evaporíticas aparecen en permeabilidades bajas. En cambio en rocas carbonatadas y detríticas la permeabilidad media es más frecuente. Es destacable que el 47% de las medidas realizadas en las rocas detríticas del cuaternario se realizaron en permeabilidades muy altas, lo que explicaría la variabilidad de concentraciones de radón encontradas en estas unidades, tal y como se ha explicado anteriormente.

La relación existente entre radón, permeabilidad y origen de las unidades litoestratigráficas se muestra en la tabla 35, donde se presenta la media aritmética de las concentraciones de ^{222}Rn obtenidas para cada tipo de origen petrológico y permeabilidad del substrato.

	M.A (Bq/m ³)	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
		M.A (Bq/m ³)	M.A (Bq/m ³)	M.A (Bq/m ³)	M.A (Bq/m ³)	M.A (Bq/m ³)
Carbonatadas	65	68	58	64	65	79
Detríticas	64	58	54	75	63	28
Detríticas Cuaternario	69	153	38	57	75	76
Evaporíticas	70	40	89	28		
Ígneas	152		152			
Meta Detríticas	119	80	125	48	46	
Volcánicas	54	60	49		81	

Tabla 35: Concentración media de ^{222}Rn según el origen y la permeabilidad.

Las mayores concentraciones de radón (>100 Bq/m³) aparecen en permeabilidades bajas en las rocas de origen ígneo y meta detrítico y en las permeabilidades muy bajas en el caso de las rocas detríticas del cuaternario. En todos estos casos el factor más determinante parece ser la composición mineralógica de las unidades.

Las rocas detríticas, carbonatadas, volcánicas o evaporíticas presentan concentraciones por debajo de los 100 Bq/m³, aun así las rocas de origen evaporítico también presentan las mayores concentraciones en las permeabilidades bajas, y las detríticas en las permeabilidades medias. Un dato a tener en cuenta es que en el origen carbonatado y volcánico las mayores concentraciones aparecen en las altas permeabilidades. En este último caso, las altas concentraciones podría estar asociadas a alta permeabilidad por fisuración (quizás karstificación en el caso de las unidades carbonatadas).

El origen petrológico de las unidades litoestratigráficas es un buen indicador inicial para identificar posibles zonas de altas concentraciones de ^{222}Rn , pues identifica dos orígenes (ígneo y meta detrítico) con una marcada tendencia a encontrar concentraciones elevadas debido principalmente a que contienen de manera general altas proporciones de uranio. Pero esta variable no debe de ser tomada como criterio único, pues como se ha descrito, en la presencia de altas concentraciones influyen otros parámetros.

8.2 PERMEABILIDAD DE LAS UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS

El estudio de la influencia de la permeabilidad de las unidades litoestratigráficas en la concentración de radón se realizó analizando el mapa interpolado de permeabilidades, los mapas de probabilidad de presencia de cada tipo de permeabilidad y a través de los datos puntuales de concentración de ^{222}Rn obtenidos.

Al ser la permeabilidad de los terrenos uno de los factores a priori más influyentes en la aparición de altas concentraciones de radón en las viviendas, es necesario hacer un análisis descriptivo detallado de este factor. El IGME ofrece una clasificación de permeabilidad para cada tipo de unidad litoestratigráfica, pero como ya se ha comentado estos datos no reflejan la permeabilidad de la formación superficial, que es la que mayor relevancia tiene en el mecanismo de transporte del radón. A pesar de ello, se ha analizado este factor porque permite describir las unidades litoestratigráficas con un alto interés hidrogeológico y por ser la base de los mapas de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200,000.

La clasificación de permeabilidad para cada tipo de litoestratigrafía puede ser: muy alta, alta, media, baja y muy baja, predominando en la península las permeabilidades medias y bajas (tabla 36).

	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Muy Alta	36618	7
Alta	84935	17
Media	107240	22
Baja	213776	43
Muy Baja	52305	11
Sup total P.I	494663	100

Tabla 36: Representatividad de cada clase de permeabilidad.

El IGME categoriza la permeabilidad, pero no asocia un valor a cada tipología. Aunque la permeabilidad (o conductibilidad hidráulica, Ley de Darcy) es una magnitud cuantificable en unidades de velocidad para cada tipo de material), es difícil asignar un valor concreto a las grandes unidades litoestratigráficas, sobre todo si también se tiene en cuenta la porosidad por fisuración. Analizando la bibliografía asociada a las permeabilidades (Neznal, et al., 2004; González de Vallejo, L., 2015; Hoek, E et al., 1981; Hudson, J.A, et al., 2000), se les puede asociar un valor, dentro de una escala,

que refleje al menos el orden de magnitud. Para simplificar el estudio de este factor, en este trabajo se ha asignado a cada tipo de permeabilidad un valor numérico desde 5 (permeabilidad muy alta) hasta el 1 (permeabilidad muy baja) (tabla 37).

VALOR	Permeabilidad				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
	1	2	3	4	5

Tabla 37: Categorías de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

La obtención del mapa interpolado de permeabilidades (figura 54) se generó a partir de la intersección de una malla de 2,5 x 2,5 km² y la capa vectorial de permeabilidades con los valores previamente asignados de 1 a 5. Al analizar los datos obtenidos en la intersección se observa que la distribución tiene un comportamiento log normal (figura 53), por lo que de la misma manera y con la misma metodología que en el caso de otras variables anteriormente descritas se realizó el modelo utilizando una técnica de interpolación de tipo IDW.

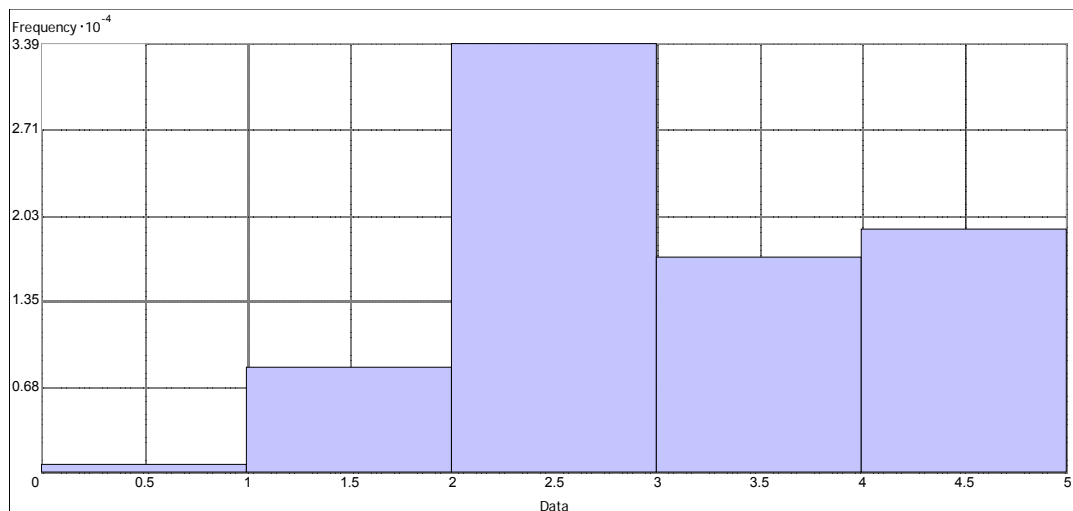


Figura 53: Distribución de los datos de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

El resultado es que para cada celda de 10 x 10 km² de la península ibérica se obtiene un valor promedio de permeabilidad.

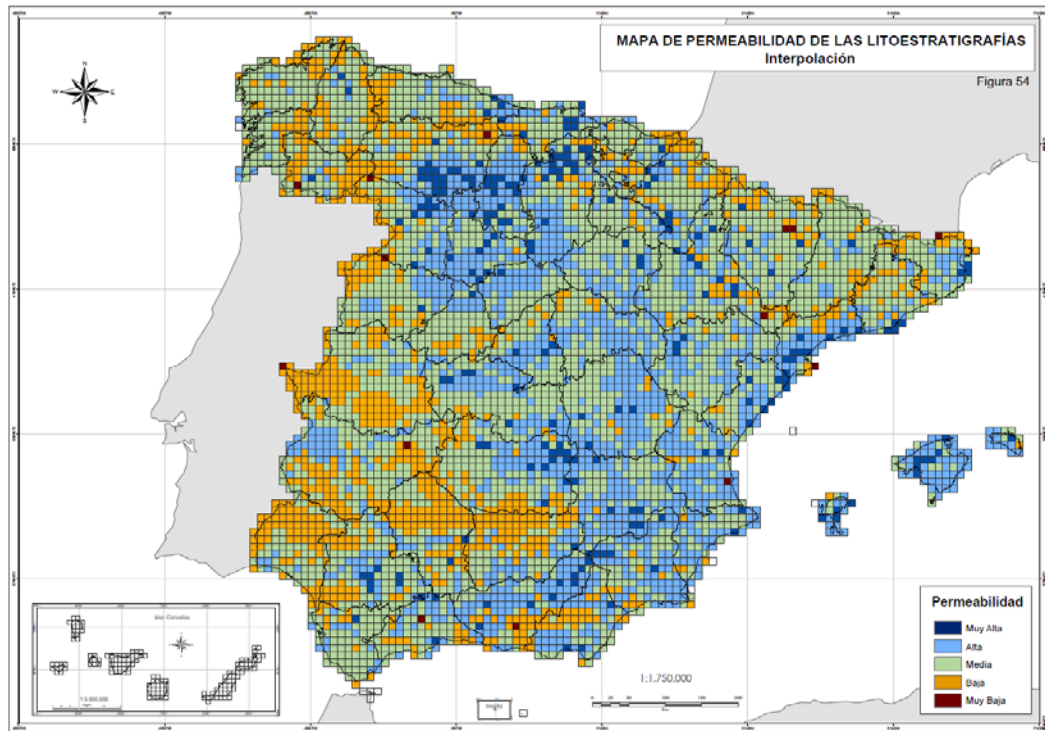


Figura 54: Mapa interpolado de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

Al comprobar el grado de asociación de este mapa de permeabilidades con el mapa de concentración de ^{222}Rn (figura 55) se observa que su correlación es muy débil, con un $R= 0.12$. La tendencia señala ligero un pico de concentraciones de radón en la categoría correspondiente a las permeabilidades bajas (categoría 2).

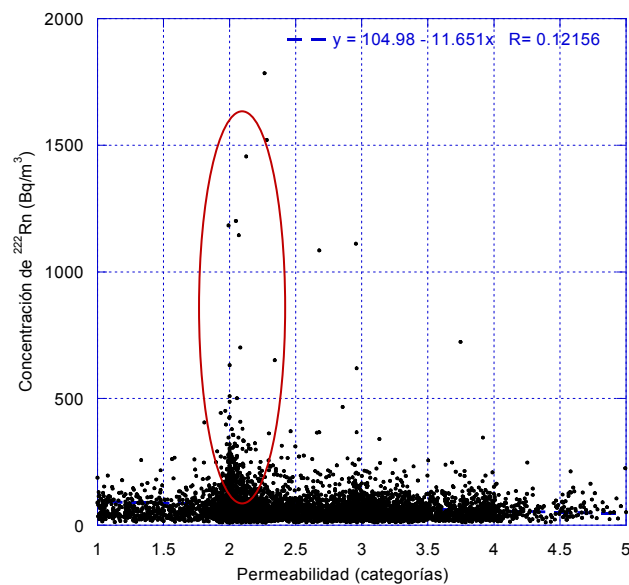


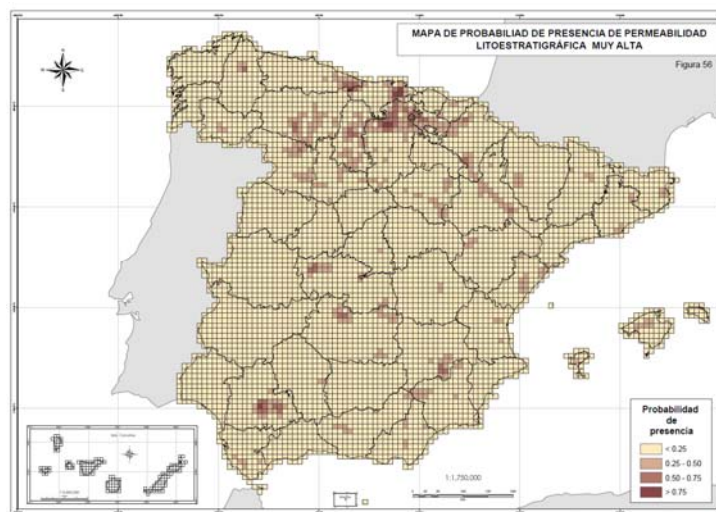
Figura 55: Correlación entre permeabilidad de las unidades litoestratigráficas y la concentración de ^{222}Rn .

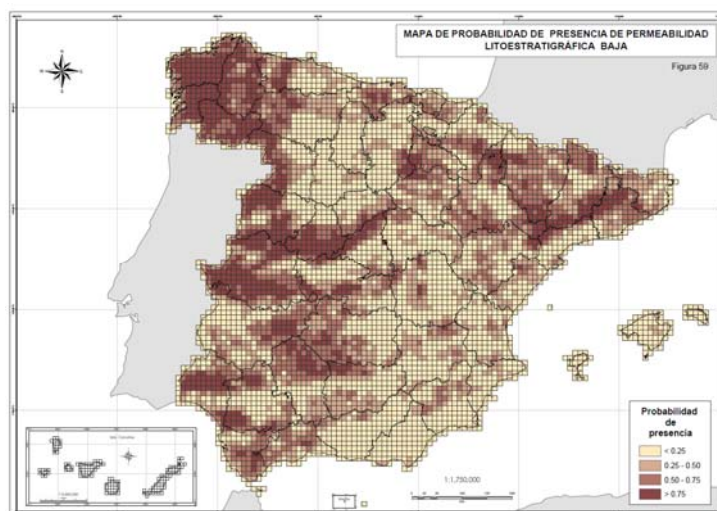
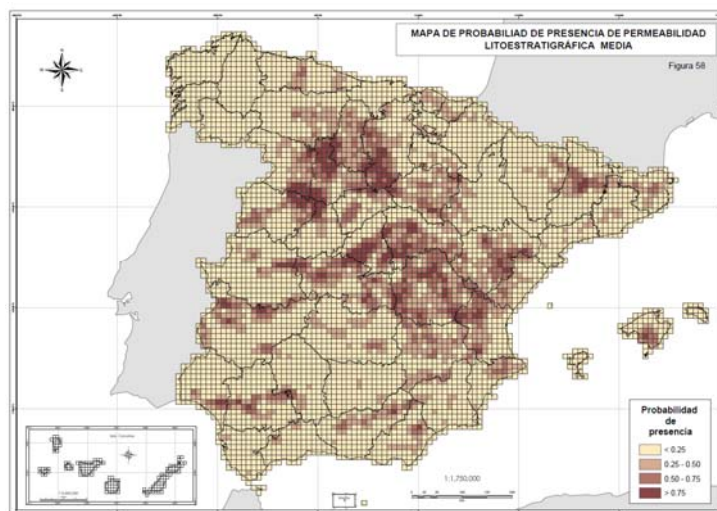
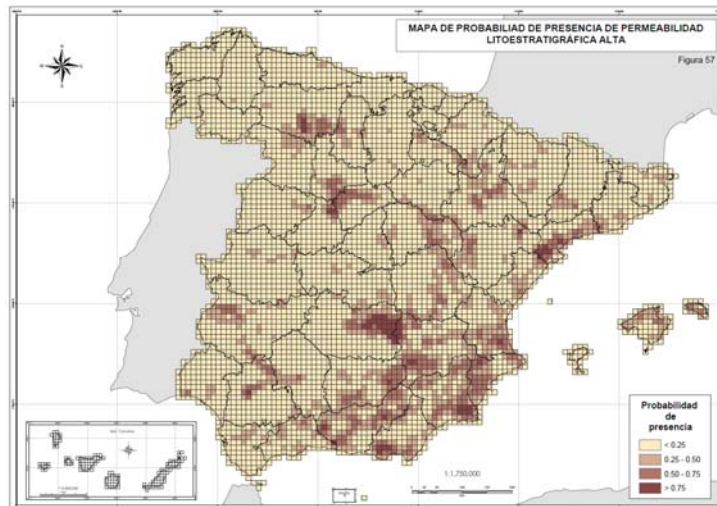
El análisis de los datos de concentración de ^{222}Rn obtenidos por celdas para cada categoría de permeabilidad (tabla 38) indica la misma tendencia: a medida que se reduce la permeabilidad es más probable que aumenten las concentraciones de ^{222}Rn

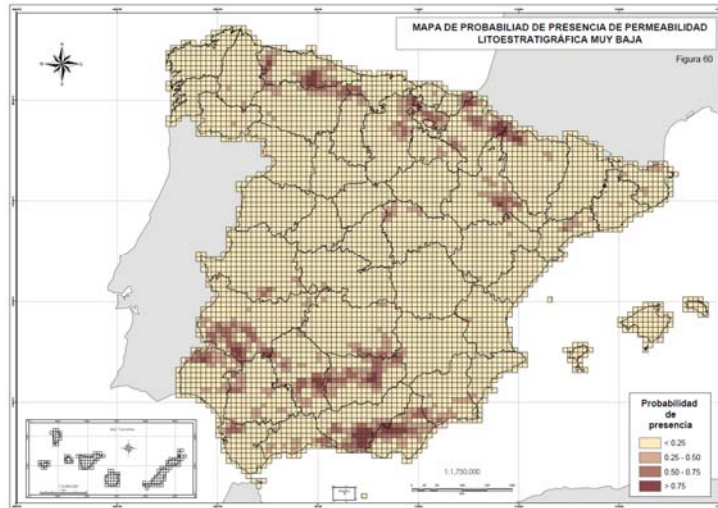
	Nº de celdas por categoría de permeabilidad		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Muy Alta	201 (89%)	23(10%)	1 (1%)
Alta	1320 (85%)	220 (14%)	8 (1%)
Media	1907 (77%)	540 (21%)	37 (2%)
Baja	757 (73%)	256 (25%)	25 (2%)
Muy Baja	8 (57%)	5 (36%)	1(7%)

Tabla 38: Número de celdas por categoría de permeabilidad litoestratigráfica.

El estudio individual de cada una de estas permeabilidades se realizó a través de sus mapas de probabilidad (figuras 56 a 60).

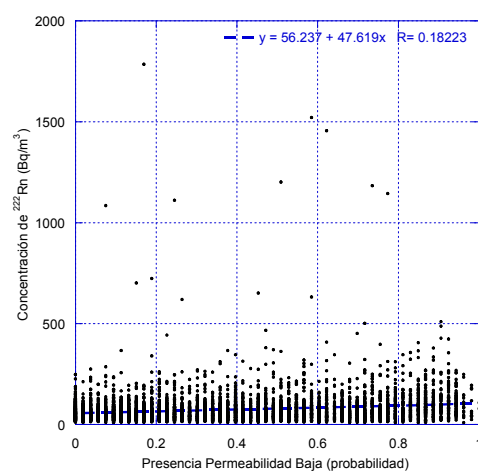
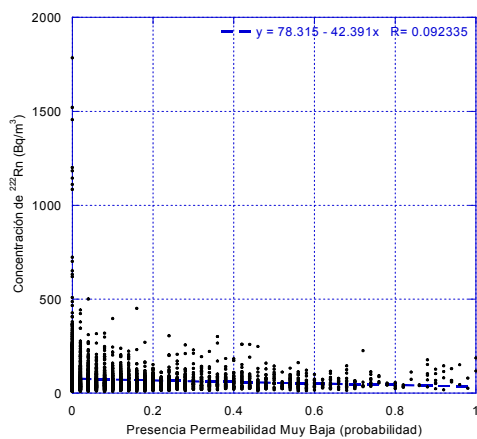


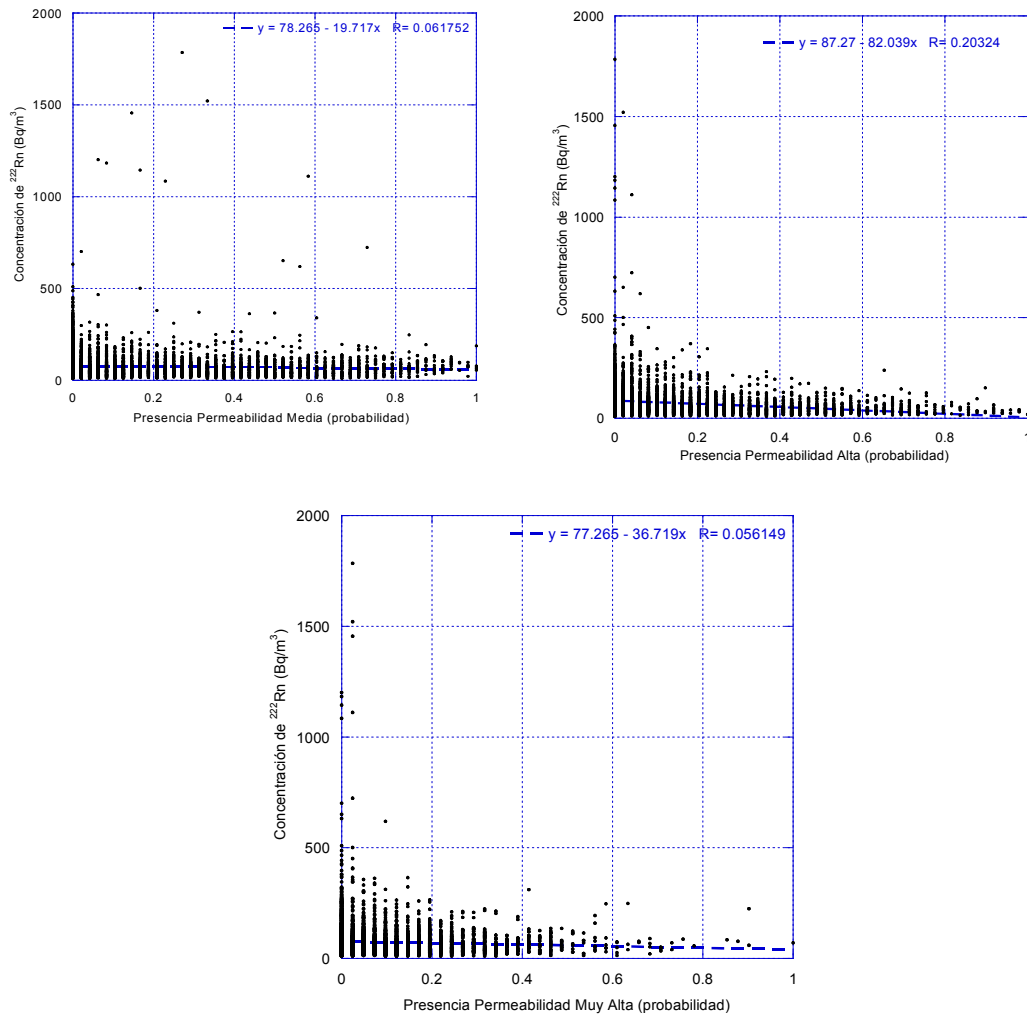




Figuras 56-60: Mapas de probabilidad de presencia de cada una de las clases de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas.

Las siguientes figuras 61 a 65 muestran la correlación entre las concentraciones de ^{222}Rn y cada una de estas permeabilidades.





Figuras 61-65: Correlación entre las concentraciones de ²²²Rn y la presencia de las diferentes permeabilidades de las unidades litoestratigráficas.

Se observa que las permeabilidades muy altas, altas, medias y muy bajas presentan una tendencia negativa con el radón siendo su correlación más fuerte en las permeabilidades altas (R=0.20).

Las permeabilidades muy altas, muy bajas o medias a pesar de tener una tendencia ligeramente negativa su baja correlación con las concentraciones de radón indica una escasa vinculación (R=0.06, R=0.09 y R=0.06 respectivamente).

Las permeabilidades bajas presentan una tendencia positiva con el ²²²Rn siendo su correlación de R=0.18.

Para comprobar estas tendencias se analizó la probabilidad media de encontrar estas permeabilidades según los rangos de concentración de radón (tabla 39).

	Presencia de Permeabilidad de las Litoestratigrafías		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (% Muy Alta)	9%	7%	3%
Probabilidad media (%) Alta	18%	8%	4%
Probabilidad media (%) Media	22%	17%	12%
Probabilidad media (%) Baja	34%	50%	60%
Probabilidad media (%) Muy Baja	11%	7%	2%

Tabla 39: Probabilidad media de presencia de la clase de permeabilidad según los rangos de concentración de ²²²Rn.

Parece por lo tanto que cuanto mayor es la presencia de unidades litoestratigráficas con permeabilidades bajas existe una mayor probabilidad de encontrar mayores concentraciones de ²²²Rn. Las permeabilidades bajas se encuentran presentes en el 60% de las celdas con más de 300 Bq/m³ y en un 50% de las celdas con un rango de 100-300Bq/m³. También se encuentra cierta probabilidad de encontrar concentraciones elevadas en las litoestratigrafías con permeabilidades medias. Pero en las permeabilidades muy bajas, altas y muy altas no es probable encontrar altas concentraciones. A pesar de que esta correlación parece bastante concluyente, es necesario considerar que la variable permeabilidad (asignada por el IGME a cada unidad litoestratigráfica, al igual que la variable origen petrológico) es muy dependiente de las unidades litoestratigráficas, de manera que por ejemplo las unidades con alto contenido en uranio (ígneas y metamórficas) son unidades poco permeables (permeabilidad del substrato).

La comprobación de estos resultados se realizó a partir de los datos de medidas directas de concentración de ²²²Rn.

La tabla 40 muestra la estadística obtenida para cada tipo de clase de permeabilidad:

	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja
% de medidas	1552 (15%)	1618 (15%)	1652 (16%)	4929	833 (85)
M.A (Bq/m ³)	76	69	85	127	76
D.s M.A	87.65	133.40	320.93	350.51	98.91

Tabla 40: Estadística de concentración de ²²²Rn en cada clase de permeabilidad litoestratigráfica.

Las mayores concentraciones de ^{222}Rn aparecen en las permeabilidades litoestratigráficas bajas (127 Bq/m^3) superando la media nacional. El resto de permeabilidades presentan unas concentraciones de radón similares, siendo ligeramente superiores en el caso de las permeabilidades medias.

La tabla 41 muestra el número de medidas realizadas en cada rango de concentración para cada tipo de permeabilidad:

	Concentración de ^{222}Rn por Permeabilidad de las Litoestratigrafías		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Muy Alta	1211 (78%)	298 (19%)	43 (3%)
Alta	1357 (83%)	226 (14%)	35 (2%)
Media	1299 (79%)	308 (19%)	45 (3%)
Baja	3114 (63%)	1430 (29%)	385 (8%)
Muy Baja	657 (79%)	149 (18%)	27 (3%)

Tabla 41: Número de medidas realizadas por rangos de concentración de ^{222}Rn .

Las unidades litoestratigráficas con permeabilidades bajas son las que presentan mayores concentraciones, tanto en el rango de concentraciones de $100\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$ (29%) como en el caso de concentraciones superiores a 300 Bq/m^3 (un 8% de las medidas).

La representación gráfica (figura 66) de estas permeabilidades según rangos de concentración de ^{222}Rn muestra los anteriores resultados:

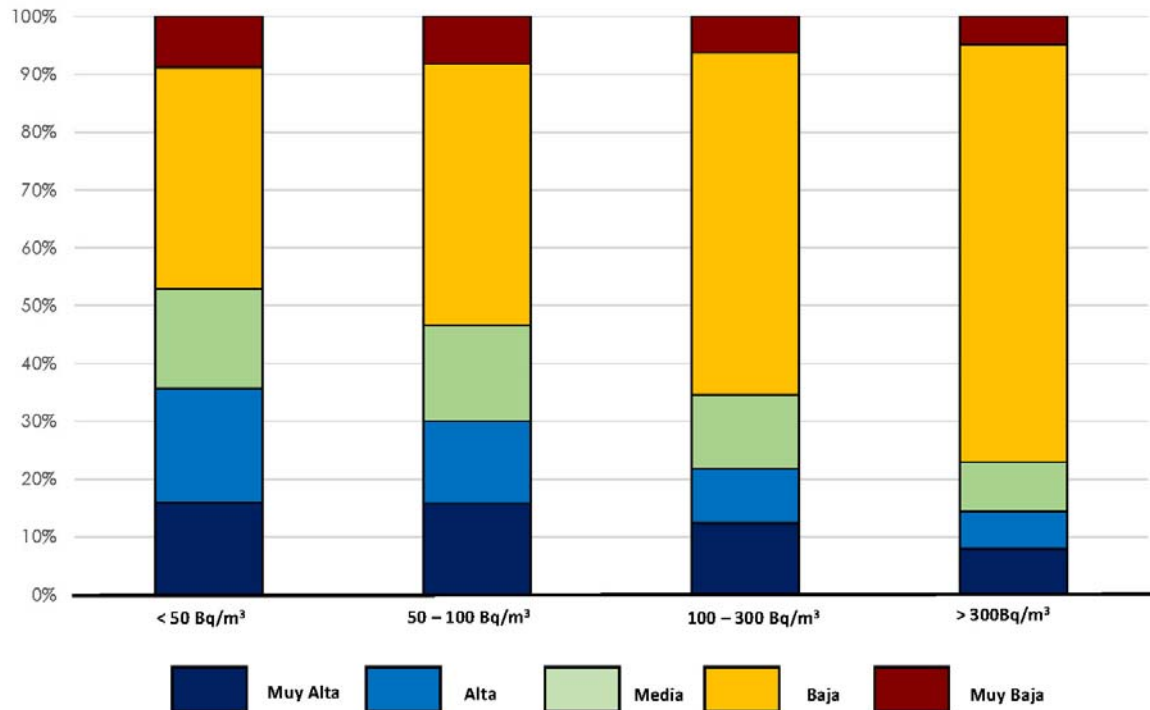


Figura 66: Concentraciones de ^{222}Rn y tipo de clase de permeabilidad litoestratigráfica.

Para el total de medidas realizadas en localidades en las que las concentraciones no superan los 50 Bq/m^3 , aproximadamente la mitad de éstas se realizaron en litoestratigrafías definidas como de baja y muy baja permeabilidad. Un 40% aproximadamente en litoestratigrafías de alta y muy alta permeabilidad, y un 20 % restante en permeabilidades medias.

En el rango de los $50\text{-}100 \text{ Bq/m}^3$ los valores son similares, pero se observa que las medidas realizadas en unidades litoestratigráficas con permeabilidades bajas ganan peso respecto a las unidades con permeabilidades medias-altas. Este hecho se comprueba en las medidas realizadas en las concentraciones más elevadas: en el caso del rango $100\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$, solo el 20% de las medidas se realizaron en unidades litoestratigráficas con permeabilidades altas o muy altas, mientras que aproximadamente el 60% fueron realizadas en permeabilidades bajas o muy bajas. Y en el rango de concentraciones superiores a 300 Bq/m^3 es en donde las litoestratigrafías con permeabilidades bajas o muy bajas son las predominantes (aproximadamente un 80%) frente a las permeabilidades altas o muy altas (aproximadamente un 15%).

Como se ha comentado anteriormente, los resultados obtenidos de permeabilidad asociada a las unidades litoestratigráficas, reflejan su relación respecto a la permeabilidad de la roca del substrato y no de los metros más superficiales del suelo. Además, hay que considerar que las unidades de permeabilidad están muy condicionadas (son muy dependientes) por la naturaleza petrológica de las unidades litoestratigráficas. Ambas razones pueden explicar los resultados obtenidos en este apartado que reflejan que las altas concentraciones de ^{222}Rn están vinculadas con las clases de baja permeabilidad litoestratigráfica. Así, las bajas permeabilidades principalmente se encuentran asociadas a rocas de origen ígneo (granitos) y meta detrítico (pizarras, cuarcitas, esquistos), así como a rocas detríticas originadas a partir de las anteriores (arcosas y grauvacas), que son en esencia las que contienen de altas proporciones de uranio. De esta forma, este tipo de unidades de permeabilidades puede permitir a esta escala nacional identificar áreas con probabilidad de presentar altas concentraciones de radón, debido principalmente a que se encuentran asociadas al origen petrológico de las unidades litoestratigráficas. Para analizar el factor permeabilidad y su relación con el transporte del ^{222}Rn por el mecanismo de convección, sería necesario estudiar este factor a escala de detalle para comprobar la permeabilidad los primeros metros de las formaciones superficiales.

8.3 TIPOS DE UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA

Como se ha explicado anteriormente cada unidad litoestratigráfica de forma individualizada tiene asociado un origen petrológico (ígneo, meta detrítico, volcánico, evaporítico, detrítico o detrítico del cuaternario) y un rango de permeabilidad (muy alto, alto, medio, bajo o muy bajo). Estos dos factores han sido analizados anteriormente, pero para realizar un estudio completo de las unidades litoestratigráficas se analizó el estudio previo de [García et al. \(2013b\)](#) que delimitaba una serie de zonas propensas a presentar concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m^3 y los 330 tipos de unidades litológicas de la península, para obtener una serie de unidades con base litoestratigráfica vinculadas con el ^{222}Rn .

8.3.1. ESTUDIO DE ZONAS CON PRESENCIA POTENCIAL DE RADÓN

A partir del estudio “Mapping radon-prone áreas using radiation dose rate and geological information” (García et al., 2013b) se identificaron 40 litoestratigrafías enmarcadas dentro de las zonas potenciales a presentar altas concentraciones de ^{222}Rn (figura 67)

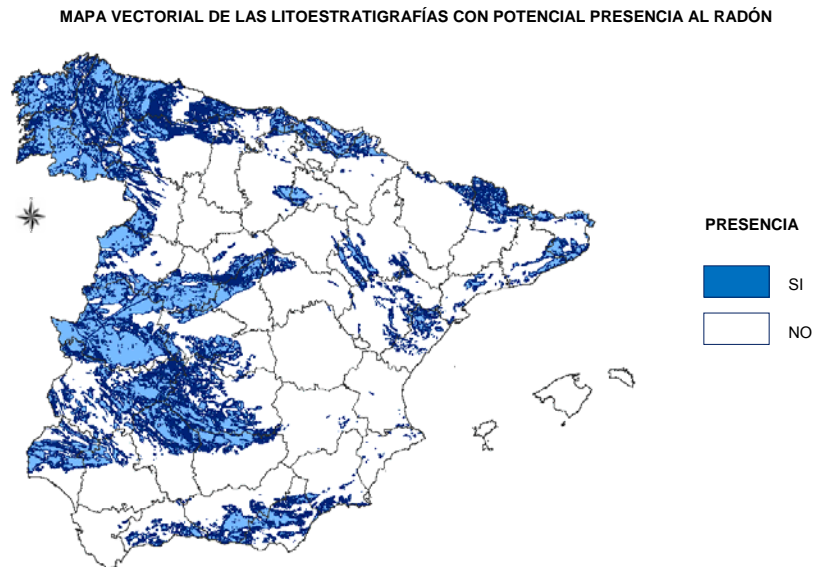


Figura 67: Mapa vectorial que incluye las 40 unidades litoestratigráficas potenciales al radón, agrupadas en la categoría Presencia = SI.

Estas unidades litoestratigráficas potenciales se agruparon en una única capa de información. Así, mediante la intersección de la malla de $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ se creó el mapa de probabilidad de presencia de unidades litoestratigráficas con presencia potencial al radón. (Figura 68).

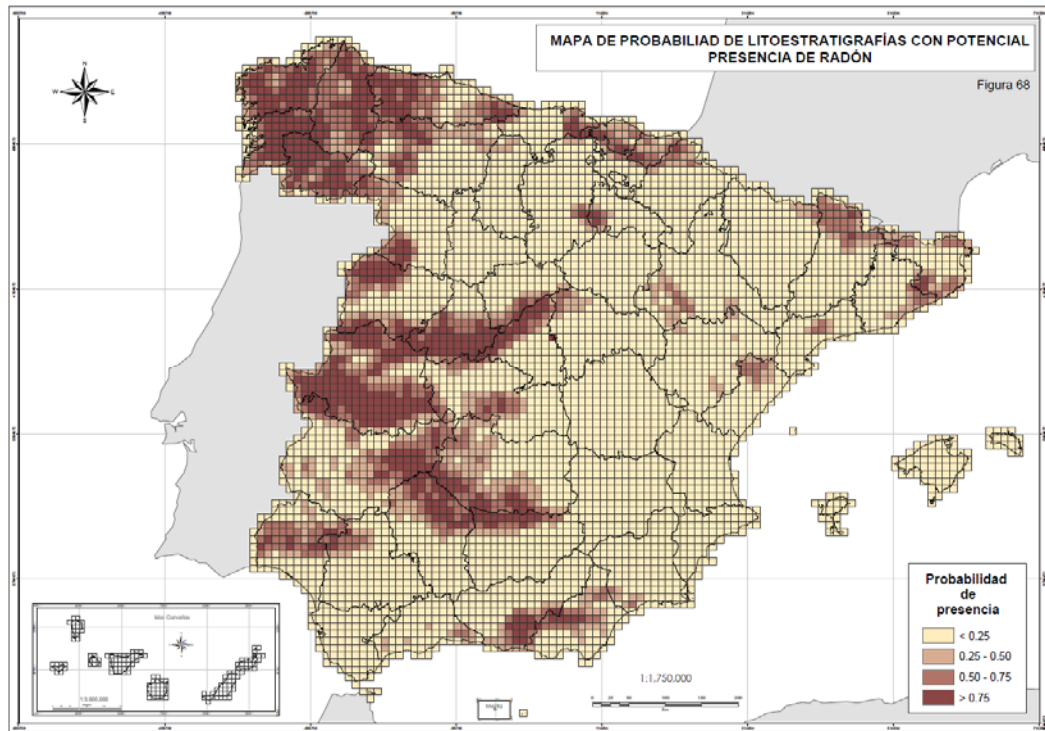


Figura 68: Mapa de probabilidad de presencia de las 40 litoestratigrafías potenciales al ^{222}Rn

La correlación entre el mapa interpolado de concentraciones de ^{222}Rn y el mapa de probabilidad de presencia de estas unidades litoestratigráficas se muestra en la figura 69, indicando una correlación de R de 0.29.

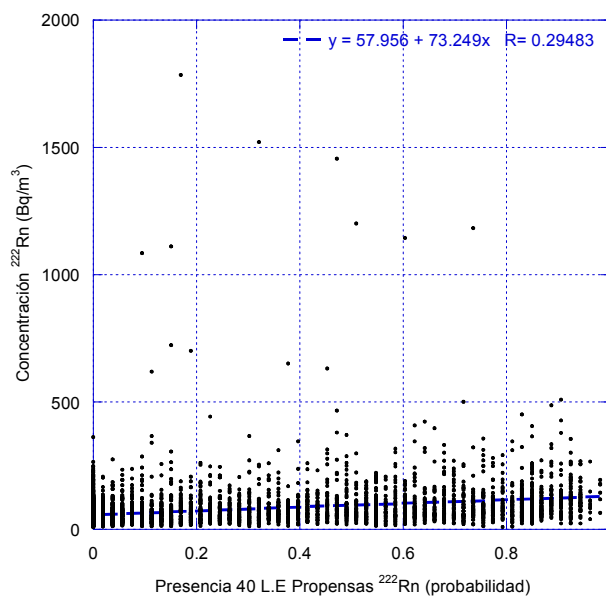


Figura 69: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de las 40 unidades litoestratigráficas potenciales al ^{222}Rn .

La tendencia es positiva, con una correlación aceptable. Al analizar las 40 unidades litoestratigráficas de manera agrupada, según la probabilidad de presencia en los diferentes rangos de concentración, los resultados son los que siguen (tabla 42):

	Presencia de 40 litoestratigrafías potenciales al ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	17%	42%	56%

Tabla 42: Probabilidad media de presencia de las 40 litoestratigrafías potenciales según los rangos de concentración de ^{222}Rn

Como se muestra en la tabla, la probabilidad de encontrar altas concentraciones en estas zonas es elevada: 56% en el caso de concentraciones superiores a los 300 Bq/m³ y 42% en el caso del rango de entre 100-300 Bq/m³.

Para comprobar que estas unidades de roca eran potenciales de producir altas concentraciones de radón, se generaron capas vectoriales individualizadas para cada una de ellas y se interseccionaron con los datos de las medidas de concentración de ^{222}Rn .

La tabla 43 muestra los datos obtenidos de concentración de las 3829 medidas realizadas sobre estas zonas identificadas como potenciales al radón.

	Concentración de ^{222}Rn 40 litoestratigrafías potenciales al ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	2193 (57%)	1277 (33%)	358 (9%)

Tabla 43: Concentración de ^{222}Rn en las 40 unidades litoestratigraficas potenciales al ^{222}Rn .

El 9% de las medidas se encuentran en el rango de más de 300 Bq/m³ y un 33% entre los 100 y 300 Bq/m³ un dato que refleja que esta agrupación de 40 unidades identifica de manera aceptable las zonas de altas concentraciones.

Estos 40 grupos geológicos representan el 25% del territorio peninsular (125,227 km²) y sobre ellas vive el 12% de la población (20,000 entidades de población y 5 millones de habitantes). Al realizar un análisis de los núcleos de población dentro de esta área,

se comprueba que en la gran mayoría de los casos (el 97%) son entidades de población que no superan los 1000 habitantes. Pero un dato a destacar son las 59 entidades por encima de los 10,000 habitantes que se encuentran en estas zonas, 9 de ellas superan los 50,000 habitantes: Bilbao, S^a Coloma de Gramanet (Barcelona), Ourense, Cáceres, Lugo, Ceuta, Toledo, Ávila y Linares (Jaén).

Cada una de estas 40 unidades litoestratigráficas tiene una mayor o menor representatividad en el total de la superficie peninsular. Este hecho influirá en el análisis de la variable, pues el número de medidas realizadas en cada una de las tipologías es de importancia en cuanto a los datos estadísticos finales. En el anexo de tablas se muestra la relación completa de estas 40 unidades litoestratigráficas junto con los datos estadísticos obtenidos para cada una de ellas. La densidad de muestreo es diferente en cada una de ellas, pero se tiene que tener en cuenta que en España existen numerosas zonas despobladas que imposibilita una toma de muestras representativa para todas las unidades y que, como ya se ha indicado, el muestreo de las medidas no fue aleatorio.

8.3.2. ESTUDIO DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS VINCULADAS AL ²²²Rn

Del apartado anterior, hay que remarcar la existencia de celdas con altas concentraciones de radón que no se enmarcan dentro del área de las 40 unidades litoestratigráficas potenciales según García et al (2013b). Por ello se realizó un estudio alternativo, analizando los 330 tipos de unidades litoestratigráficas de la península ibérica.

Para cada una de las unidades litoestratigráficas se realizaron modelos de probabilidad de presencia, que posteriormente fueron correlacionados con el mapa interpolado de concentración de ²²²Rn con el fin de identificar las unidades litológicas vinculadas con el radón. El criterio de selección de estas unidades fue seleccionar aquellas que tuviesen un $R \geq 0$ respecto a las concentraciones de ²²²Rn. Como resultado se identificaron 107 unidades litoestratigráficas vinculadas con el radón (figura 70).

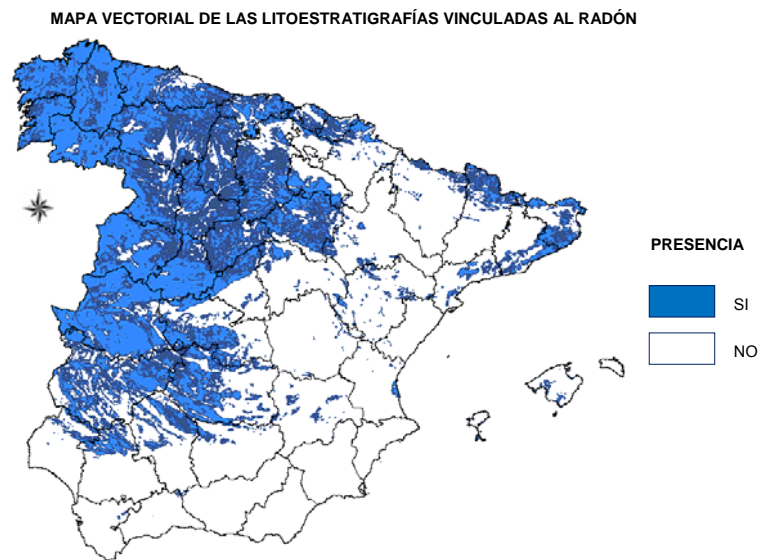


Figura 70: Mapa vectorial con las 107 unidades litoestratigráficas vinculadas con el radón.

La agrupación de estas unidades litoestratigráficas en una única capa de información permitió la creación del mapa de probabilidad de presencia de estas (figura 71).

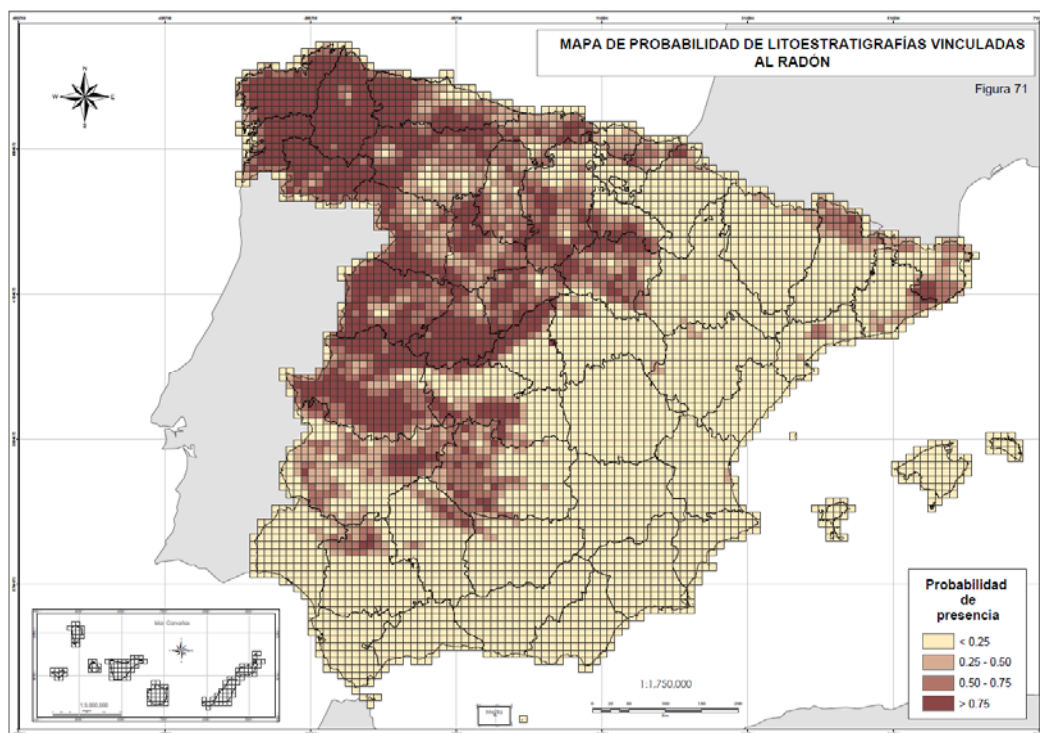


Figura 71: Mapa de probabilidad de presencia de las 107 unidades litoestratigráficas vinculadas al ^{222}Rn .

La relación entre el mapa interpolado de concentraciones de ²²²Rn y el mapa de probabilidad de presencia de estas unidades litoestratigráficas se observa en la figura 72, que indica una correlación de R de 0.41.

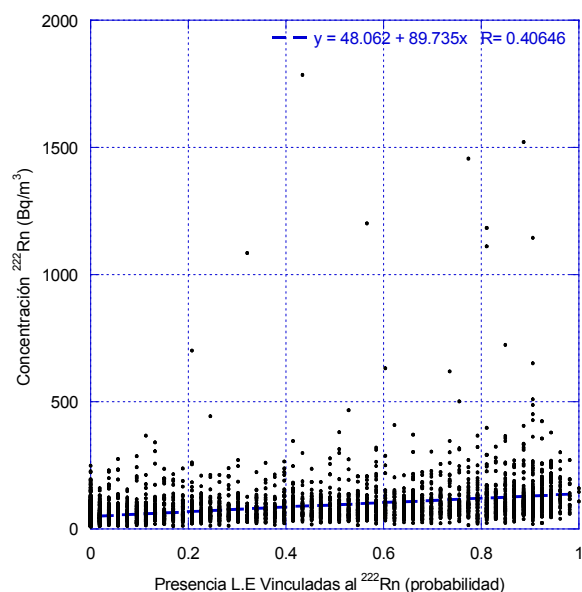


Figura 72: Correlación entre la concentración de ²²²Rn y la presencia de las 107 unidades litoestratigráficas vinculadas al ²²²Rn.

La tendencia es positiva con una correlación elevada, superior a la encontrada en el análisis de las anteriores 40 unidades litoestratigráficas (García et al 2013b).

La agrupación de estas 107 unidades litoestratigráficas en una única capa de información ha permitido estudiar la probabilidad de presencia de estas, según los diferentes rangos de concentración de radón (tabla 44).

	Presencia de 107 litoestratigrafías vinculadas al ²²² Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	21%	59%	71%

Tabla 44: Probabilidad media de presencia de las 107 unidades litoestratigráficas, según los rangos de concentración de ²²²Rn.

Como se muestra en la tabla, la probabilidad de encontrar altas concentraciones en estas zonas es elevada: un 71% en el caso de concentraciones superiores a 300 Bq/m³ y un 59% en el caso del rango entre 100-300 Bq/m³. Tiene mayor capacidad de predicción que las áreas señaladas como propensas al radón, que identificaba el 55% de los casos de más de 300 Bq/m³ y 41% en el rango de 100-300 Bq/m³.

La comprobación de estos resultados se realizó a partir de las medidas directas de concentración de radón obtenidas en el estudio, de las cuales 4693 se han realizado sobre estas zonas (tabla 45).

	Concentración de ²²² Rn 107 litoestratigrafías vinculadas al ²²² Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	2729 (57%)	1550 (33%)	414 (9%)

Tabla 45: Concentración de ²²²Rn en 107 unidades litoestratigráficas vinculadas al ²²²Rn.

Un 9% de las medidas realizadas sobre estas unidades litoestratigráficas presentan concentraciones superiores a los 300 Bq/m³ y un 33% entre los 100 y 300 Bq/m³, el mismo porcentaje que las anteriores unidades estudiadas.

La superficie de estas 107 unidades litoestratigráficas es de 165,889 km² (el 34% de la península). Dentro de estas áreas habita el 13% de la población española (6,3 millones de habitantes) en 26,200 entidades de población. En el 97% de los casos son entidades de población que no superan los 1000 habitantes, pero aparecen 71 núcleos por encima de los 10,000 habitantes, y 11 con más de 50,000 habitantes: Terrassa, Burgos, Salamanca, Badajoz, S^a Coloma de Gramanet, Ourense, Lugo, Santiago de Compostela, Toledo, Mérida, Ávila. Estas áreas deben de ser zonas prioritarias a la hora de realizar nuevas campañas de medidas.

Debido a las propias características de muestreo, no en todas las litoestratigrafías se pudieron tomar medidas de concentración de radón: se tomaron muestras en 82. De ellas el 44% (36 unidades litoestratigráficas) presentan concentraciones por encima de los 100 Bq/m³. Este dato mejora el análisis realizado con las 40 litoestratigrafías del apartado anterior, las cuales identificaban el 38% de las unidades con más de 100 Bq/m³.

En el anexo de tablas se muestra la relación completa de estas 107 unidades litoestratigráficas propensas.

8.3.3. ESTUDIO COMBINADO DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS RELACIONADAS CON EL ^{222}Rn

Este último procedimiento de identificación de las unidades litoestratigráficas potenciales identifica un número superior de rocas vinculadas con el radón al del procedimiento planteado por [García et al. \(2013b\)](#), por lo que se ha procedido a comparar ambos procedimientos.

Hay unidades litoestratigráficas señaladas como zonas propensas al ^{222}Rn en el estudio previo ([García et al., 2013](#)) que según el análisis de correlaciones no tenían relación directa con el radón y, por el contrario, unidades litoestratigráficas en las que se encontró correlación con el radón pero que no aparecían señaladas como zonas propensas al radón. La siguiente figura 73 representa las unidades litoestratigráficas identificadas con ambos procedimientos.

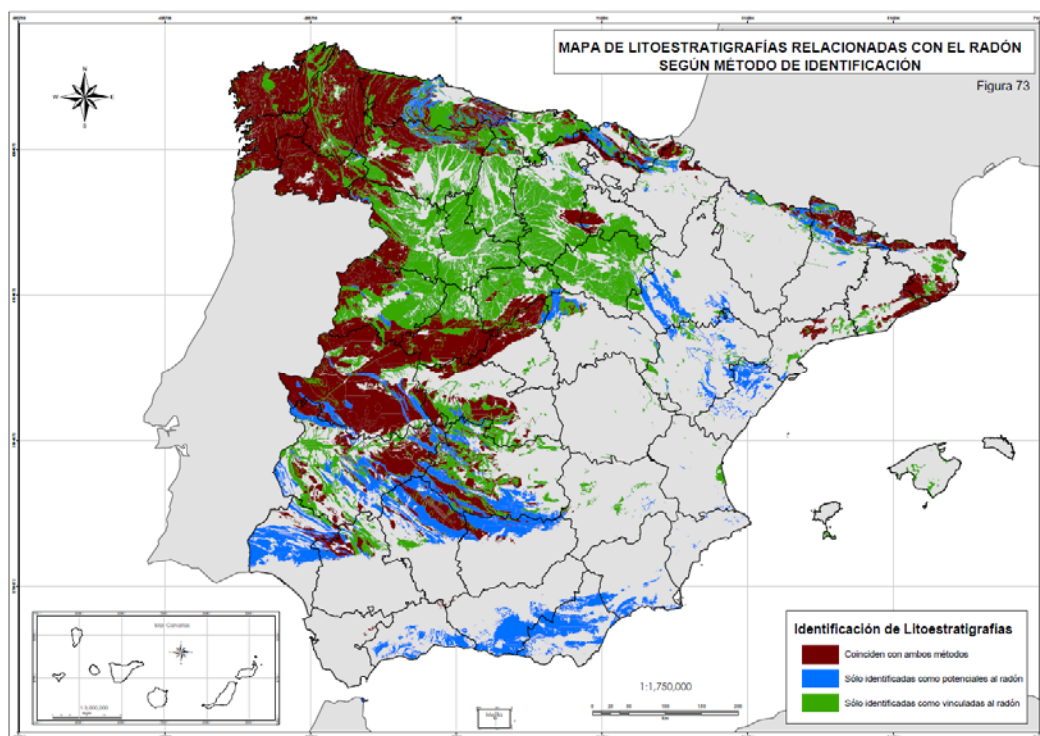


Figura 73: 125 unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn según el procedimiento de identificación.

Combinando ambos estudios (40 unidades litoestratigrafías potenciales y las 107 vinculadas) aparecen 125 unidades relacionadas con el ^{222}Rn (en anexo de tablas). Como se ve en la tabla 49, de estas 125 unidades, el 18% (22) coinciden en ambos procedimientos de identificación, un 14% (18) solo aparecen identificadas en las zonas potenciales al radón y un 68% solo aparecen en las unidades litoestratigráficas vinculadas al radón.

El promedio de concentración obtenido para las litoestratigrafías es de 111 Bq/m^3 en el caso de coincidencia con los dos métodos, 72 Bq/m^3 con las unidades solo identificadas como potenciales al radón y 103 Bq/m^3 identificadas como vinculadas al ^{222}Rn .

Para comprobar el nivel de acierto de estos sistemas se identificaron las unidades litoestratigráficas que presentan concentraciones superiores a los 100 Bq/m^3 : de las 22 unidades que coinciden en ambos sistemas, 13 de ellas (el 59%) superan este valor; en el caso de la identificación mediante zonas potenciales al radón, de las 18 unidades tan solo 3 (17%) superan los 100 Bq/m^3 y en las vinculadas son 23 unidades (27%) las que superan este rango de valor.

	125 Litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn		
	Valor promedio	Nº de L.E	Nº L.E >100 Bq/m^3
Coinciden en ambos métodos	111 Bq/m^3	22 (18%)	13 (59%)
Solo identificadas por zonas potenciales al radón	72 Bq/m^3	18 (14%)	3 (17%)
Solo identificadas por vinculadas al radón	103 Bq/m^3	85 (68%)	23 (27%)

Tabla 46: Sistemas de identificación de las 125 unidades relacionadas con el ^{222}Rn

El nivel de acierto del método de identificación de las unidades litoestratigráficas vinculadas al radón es superior, pero se asume que este método de identificación por sí solo no es efectivo, puesto que identifica un elevado número de unidades que no superan los límites de acción recomendados por las instituciones. Por ello, finalmente, para identificar las unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn se han aceptado como válidas todas las unidades litoestratigráficas identificadas en el estudio realizado por parte de [García et al. \(2013b\)](#), y también se seleccionaron las unidades litoestratigráficas vinculadas con el radón que en el estudio estadístico presentaban concentraciones superiores a los 100 Bq/m^3 .

La figura 74 muestra la representación gráfica de estas unidades litoestratigráficas, reclasificadas en 3 categorías, a partir los cuartiles de los rangos de concentración de radón ($< 88 \text{ Bq/m}^3$, $88\text{-}122 \text{ Bq/m}^3$, $>122 \text{ Bq/m}^3$). Las concentraciones medidas de estas unidades litoestratigráficas se obtienen de los datos puntuales de concentración de ^{222}Rn para cada una de estas unidades.

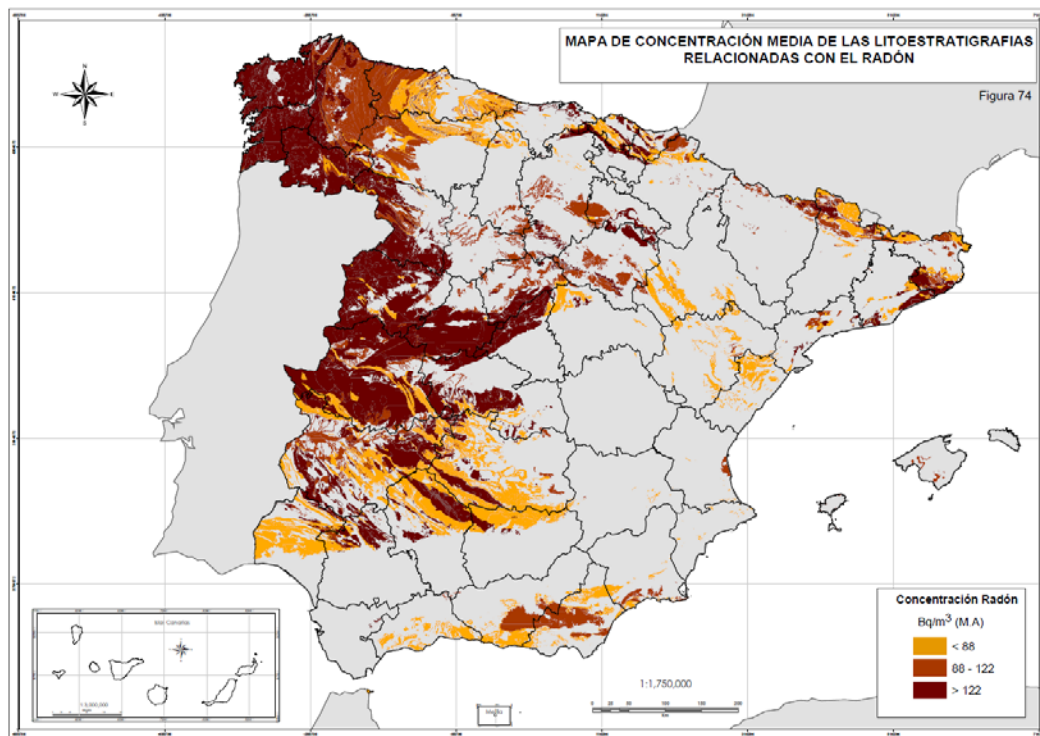


Figura 74: Concentración media de ^{222}Rn en las 63 unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn .

Se observa que estas 63 unidades litoestratigráficas, de manera general se aproximan a las señaladas al inicio de este apartado, con un mayor poder emisor de radón, y que se corresponden con las formaciones del dominio predominantemente silíceo (Macizo Varisco Ibérico). La relación completa de estas 63 litoestratigrafías aparece en el anexo de tablas.

La creación de un mapa de probabilidad (figura 75) de esta selección que incluye las 63 unidades litoestratigráficas relacionadas con el radón permite observar la correlación con el mapa interpolado de concentraciones ($R = 0.34$) (figura 76). Para una mejor interpretación de los datos, la representación gráfica se ha realizado ilustrando una probabilidad, de modo que para cada celda de $10 \times 10 \text{ km}^2$ se visualiza

el porcentaje de probabilidad de presencia de unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn .

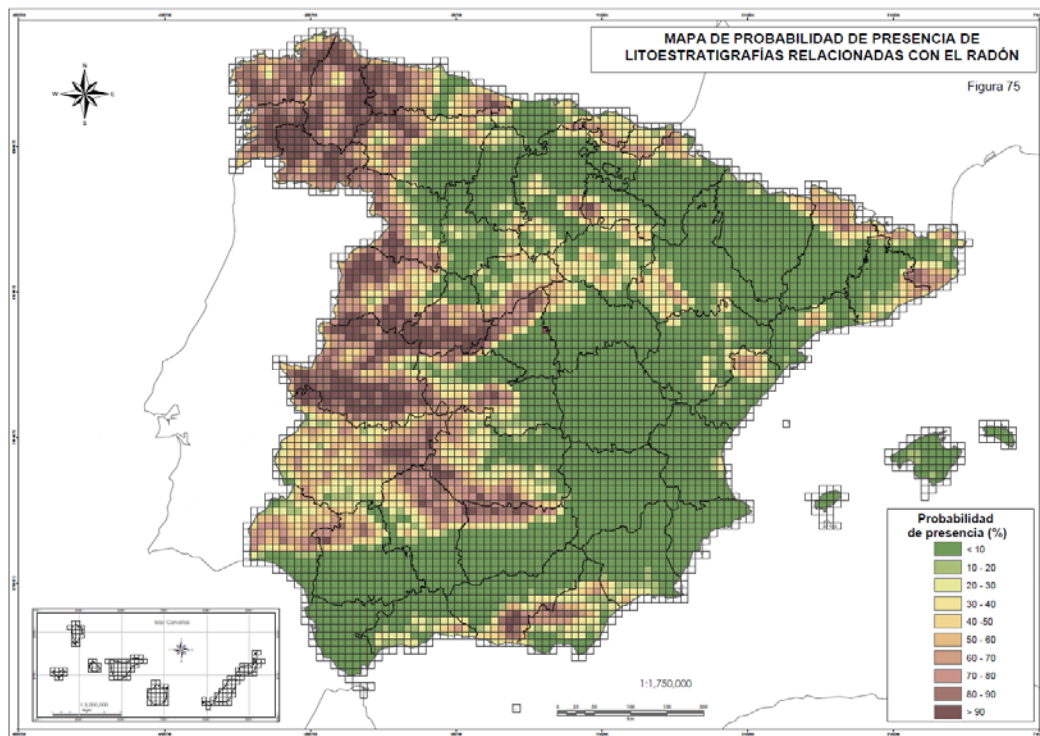


Figura 75: Mapa de probabilidad de las 63 unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn .

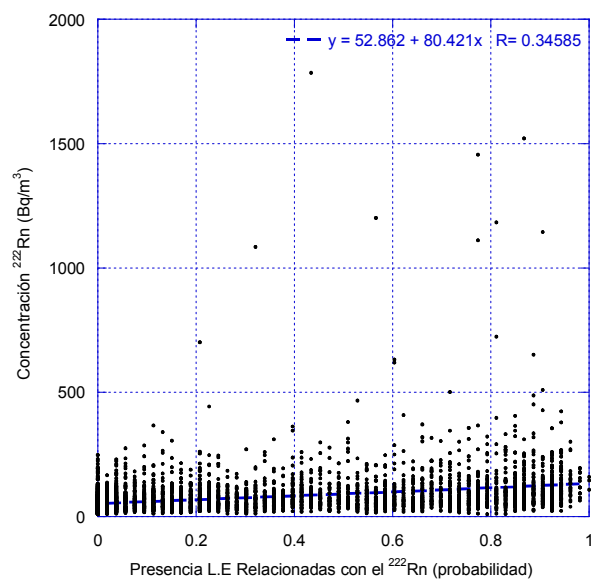


Figura 76: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de las 63 unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn

Como se puede observar en la figura, la tendencia es positiva y mejora levemente la correlación obtenida en el estudio de [García et al. \(2013b\)](#).

El análisis de la probabilidad de presencia de estas unidades en los diferentes rangos de concentración de radón se muestra en la tabla 47.

	Presencia de 63 litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	21%	47%	57%

Tabla 47: Probabilidad media de presencia de las 63 unidades litoestratigráficas según los rangos de concentración de ^{222}Rn .

Se puede observar que la probabilidad de encontrar altas concentraciones en estas zonas es elevada: un 57% en el caso de concentraciones superiores a 300 Bq/m³ y un 47% en el caso del rango entre 100-300 Bq/m³. Tiene mayor capacidad de predicción que las áreas señaladas como potenciales al radón

La tabla 48 muestra los datos obtenidos de concentración de las 4247 medidas realizadas sobre estas zonas identificadas como potenciales al radón.

	Concentración de ^{222}Rn 63 litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	2413 (57%)	1422 (33%)	412 (10%)

Tabla 48: Concentración de ^{222}Rn en las 63 unidades litoestratigráficas relacionadas con el ^{222}Rn .

El 10 % de las medidas se encuentran en el rango de más de 300 Bq/m³ y un 33% entre los 100 y 300 Bq/m³ un dato que refleja que esta agrupación de 63 unidades litoestratigráficas mejora la identificación de las zonas de altas concentraciones.

Estas 63 unidades geológicas representan el 30% del territorio peninsular (150,354 km²), y 12% de la población vive sobre ellas. Al realizar un análisis de los núcleos de población dentro de esta área, también se comprueba que en la gran mayoría de los casos (el 97%) son entidades de población que no superan los 1000 habitantes, pero que en estas zonas aparecen 67 entidades por encima de los 10,000 habitantes, teniendo 11 de ellas más de 50,000 habitantes: Badajoz, S^a Coloma de Gramanet,

Barakaldo, Ourense, Cáceres, Lugo, Santiago de Compostela, Ceuta, Toledo, Mérida y Ávila

La identificación de estas 63 unidades litoestratigráficas complementa los datos obtenidos en el estudio de (García et al., 2013b) de zonas potenciales al radón, pues incluye una serie de unidades con altas concentraciones que no se habían identificado previamente.

Recientemente el CSN ha publicado el mapa potencial de radón en España (CSN, 2017) en el cual se categorizan las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón identificando en particular aquellas áreas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presente concentraciones superiores a 300 Bq/m. En la representación de los datos se emplea el percentil 90 (P90) de la distribución de niveles de radón de los edificios de la zona, lo cual significa que el 90% de los edificios tienen concentraciones inferiores a 300 Bq/m³ y un 10% supera ese nivel.

El mapa es el que se presenta en la siguiente figura 77

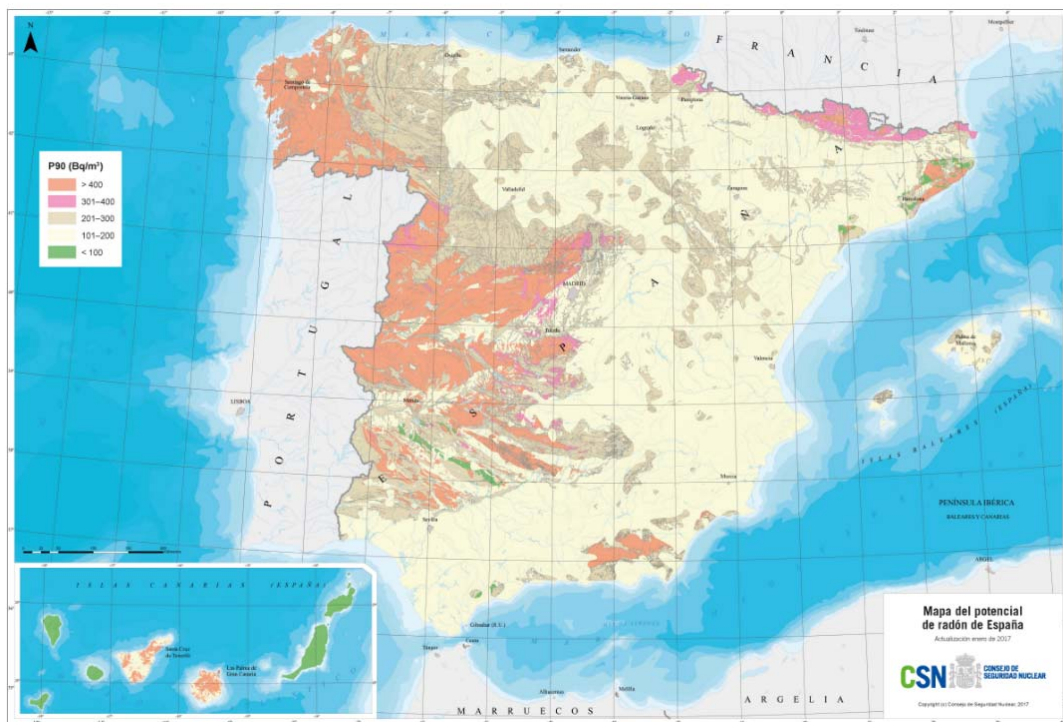


Figura 77: Mapa del potencial de radón en España. Fuente (CSN, 2017)

Una vez analizados los factores de las unidades litoestratigráficas 1:200,000, en este apartado se hace referencia a la geología utilizada en Europa a escala 1:1,000,000 del proyecto One Geology (IGME, 2014b) para comprobar la efectividad de la utilización de esta cartografía de unidades agrupadas y vocación unificadora.

Hay que tener en cuenta que los anteriores análisis se realizaron con cartografía 1:200,000 y este a escala 1:1,000,000 millón: a escala 1:200,000 se ha realizado el análisis de 330 tipos de unidades litoestratigráficas, mientras que a escala 1:100,000 millón se han analizado 25 litologías, 28 edades y 129 unidades geológicas que incluyen tanto formaciones superficiales como del sustrato.

La agrupación general de unidades permite identificar zonas propensas a tener altas concentraciones de radón, pero a su vez enmascara la propensión de algunas unidades geológicas.

9.1 TIPOLOGÍAS LITOLÓGICAS

Del mismo modo que en el caso de las unidades litoestratigráficas, se realizó un mapa de poder emisor de las litologías 1:1,000,000 (figura 77) para el cual se estimó la emisión de ^{222}Rn , a partir de la composición mineral de los distintos tipos de rocas (criterio petrológico), basándose en la tabla 1 y texto del capítulo 2.2.3: Factores geológicos: presencia de ^{226}Ra en la roca o suelo.

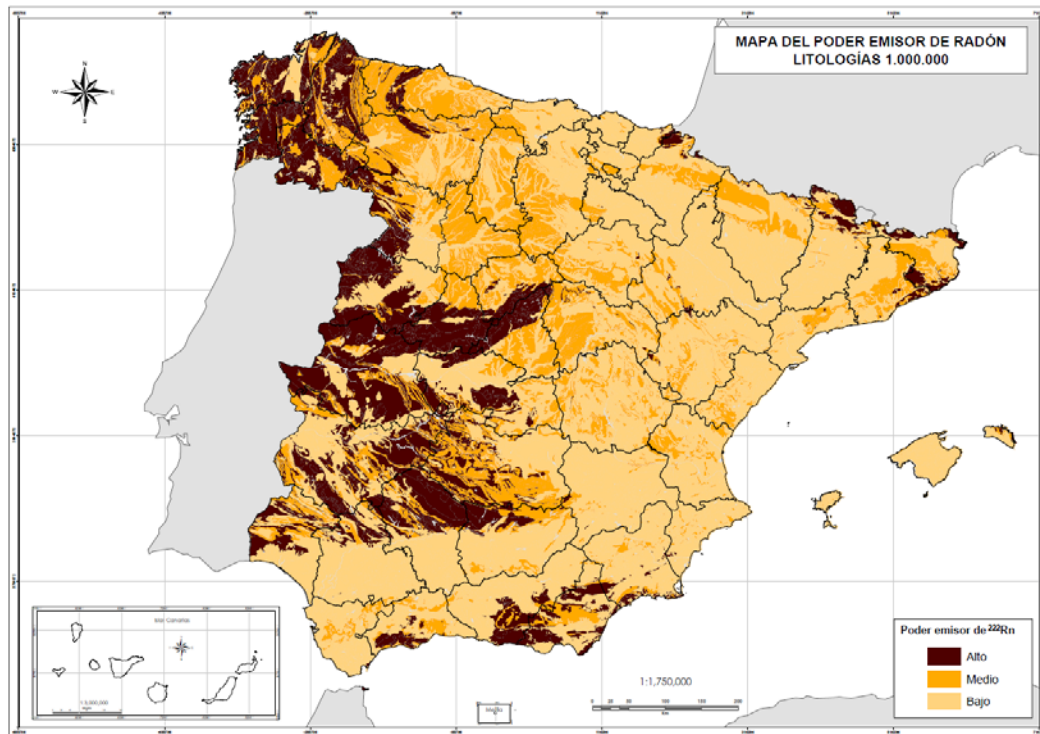


Figura 78: Estimación del poder emisor de radón de las litologías 1:1,000,000

Este mapa se clasifica en tres categorías, las cuales reflejan las litologías según su poder emisor de radón. Se observa que parte de las litologías clasificadas con alto poder emisor se corresponden al dominio silíceo

Del mismo modo que en casos anteriores basados en unidades litoestratigráficas, se realizó un mapa de densidades para cada tipo de litología para posteriormente cruzar los datos con el modelo de interpolación de radón generado. El resultado es que de las 20 tipologías litológicas que se encuadran en la península ibérica 9 poseen una vinculación positiva con el radón. (Figura79).

MAPA VECTORIAL LITOLOGÍAS VINCULADAS CON EL RADÓN

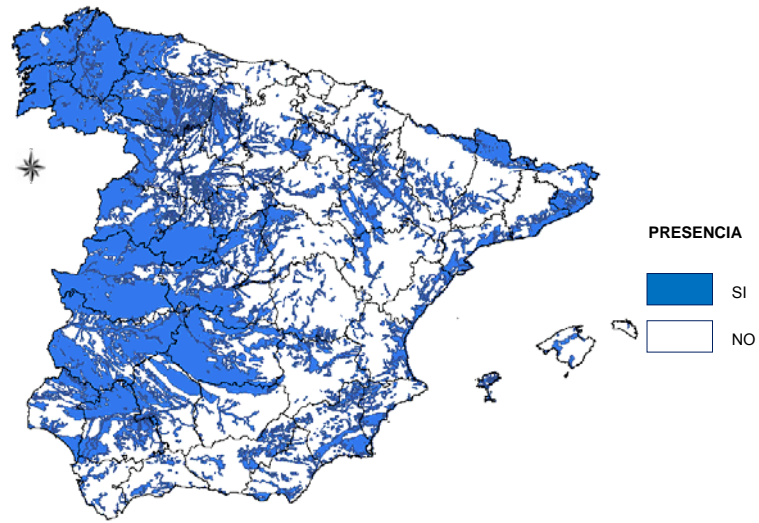
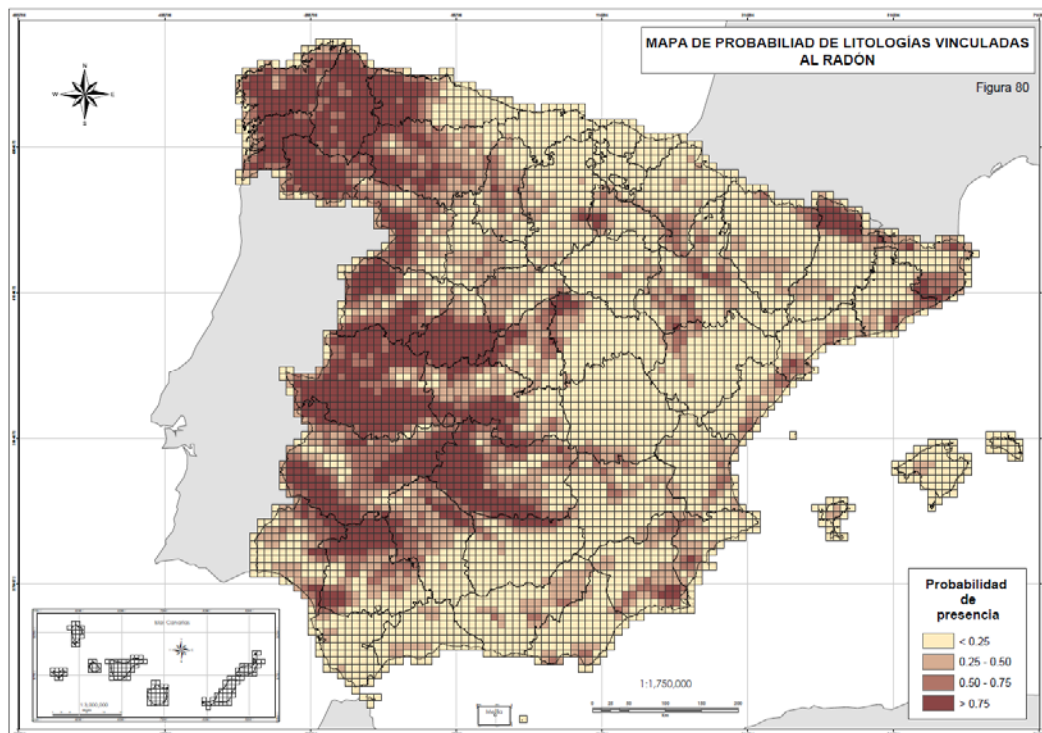


Figura 79: Mapa vectorial de las 9 litologías vinculadas con el radón.

La agrupación de estas litologías en una única capa de información permitió crear el mapa de probabilidad de presencia de estas 9 litologías (figura 80), en el cual para cada celda de 10 x 10 km² existe una probabilidad entre 0 y 1 de encontrar este tipo de materiales.

Figura 80: Mapa de probabilidad de presencia de las 9 litologías vinculadas con el ²²²Rn.

La relación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la probabilidad de presencia de estas litologías se observa en la nube de puntos de la figura 81 que indica una tendencia positiva con correlación R de 0.24.

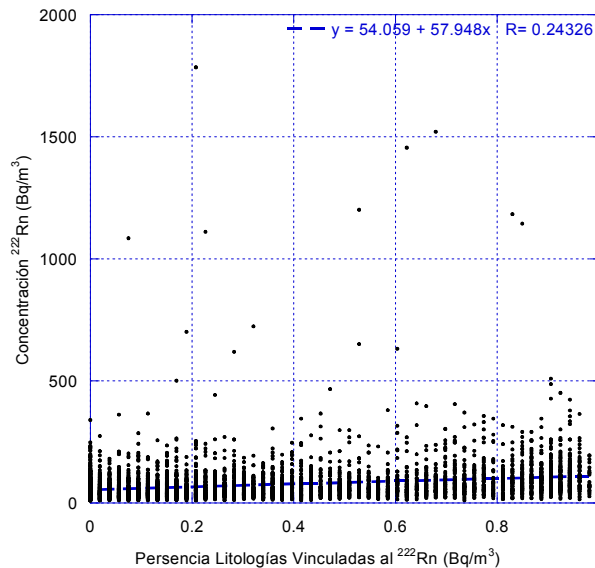


Figura 81: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de las 9 litologías vinculadas al ^{222}Rn .

El estudio de estas 9 litologías de manera agrupada según la probabilidad de presencia en los diferentes rangos de concentración de radón, refleja que la probabilidad de encontrar altas concentraciones es elevada: 62% en el caso de concentraciones superiores a 300 Bq/m^3 y 51% en el caso del rango de entre $100\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$ (tabla 49).

	Presencia de 9 litologías vinculadas al ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m^3	$100\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$	> 300 Bq/m^3
Probabilidad media (%)	30%	51%	62%

Tabla 49: Probabilidad media de presencia de las 9 litologías según los rangos de concentración de ^{222}Rn

Para comprobar estos resultados, se analizaron estas 9 litologías a partir de las medidas directas de concentración de radón obtenidas en el estudio de las cuales 5906 se han realizado sobre estas zonas (tabla 50). En la tabla se observa que hay un gran porcentaje de medidas realizadas en el rango de menos de 100 Bq/m^3 y que el

7% de las medidas se encuentren en el rango de más de 300 Bq/m³, un porcentaje inferior que en la clasificación a partir de unidades litoestratigráficas (9%)

	Concentración de ²²² Rn 9 litologías vinculadas al ²²² Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	3825 (65%)	1655 (28%)	426 (7%)

Tabla 50: Concentración de ²²²Rn en las 9 litologías vinculadas al ²²²Rn

De estas 9 unidades litológicas, se tomaron muestras puntuales en todas ellas, presentado en 7 casos concentraciones por encima de la media nacional (el 78% de los casos). Este dato mejora el análisis realizado con las unidades litoestratigráficas, pero como se ha mencionado anteriormente hay que tener en cuenta el factor escala. Se está trabajando a una escala de análisis menor (1:1,000,000 millón) que en el caso de las unidades litoestratigráficas (1:200,000). En el anexo de tablas se ofrece los datos estadísticos de estas litologías.

En la siguiente figura 82 se representan estas 9 litologías atendiendo a tres clases, a partir de los cuartiles de los rangos de concentración de radón.

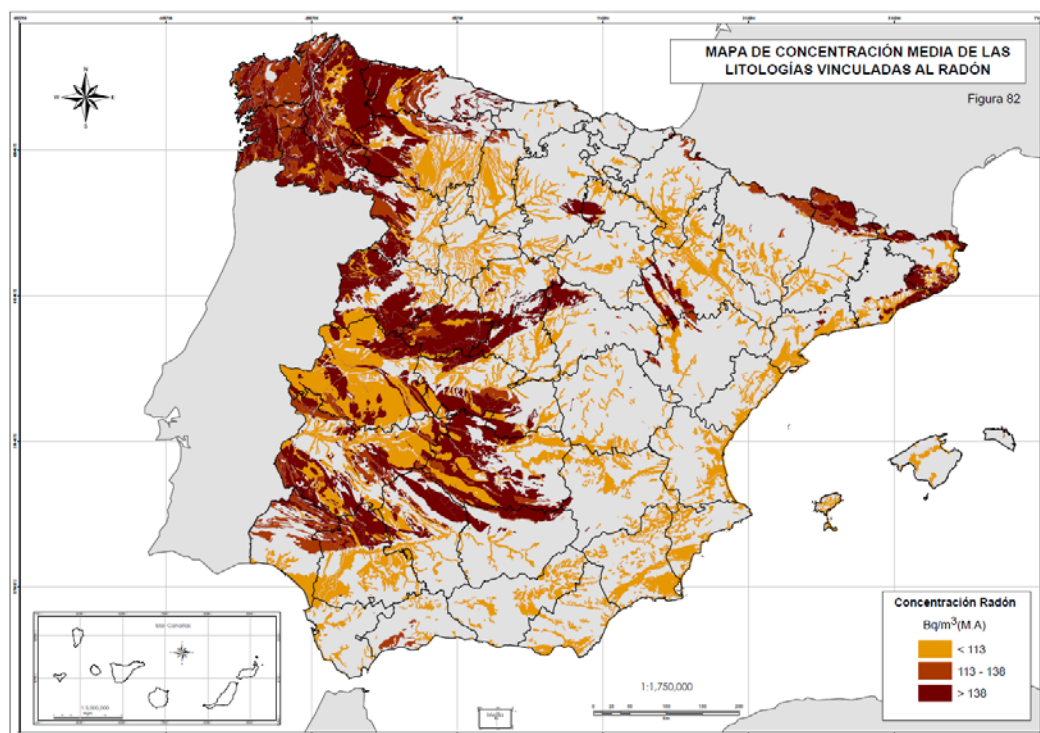


Figura 82: Concentración media de ²²²Rn en las 9 litologías vinculadas al ²²²Rn

9.2 EDADES GEOLÓGICAS DE LOS MATERIALES

El mapa de densidades para cada tipo de edad se cruzó con los datos del modelo de interpolación de radón generado y se obtuvieron 12 unidades (sistemas de edades) con vinculación positiva con el radón (Figura 83).

MAPA VECTORIAL EDADES VINCULADAS CON EL RADÓN

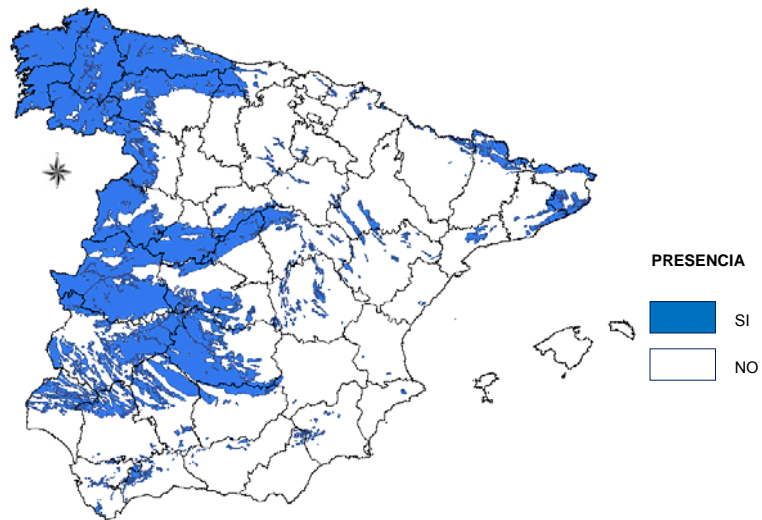


Figura 83: Mapa vectorial de las 12 edades geológicas vinculadas al radón

Mediante la agrupación de estas litologías se confeccionó el mapa de probabilidad de presencia de estas 12 unidades de edad (figura 84).

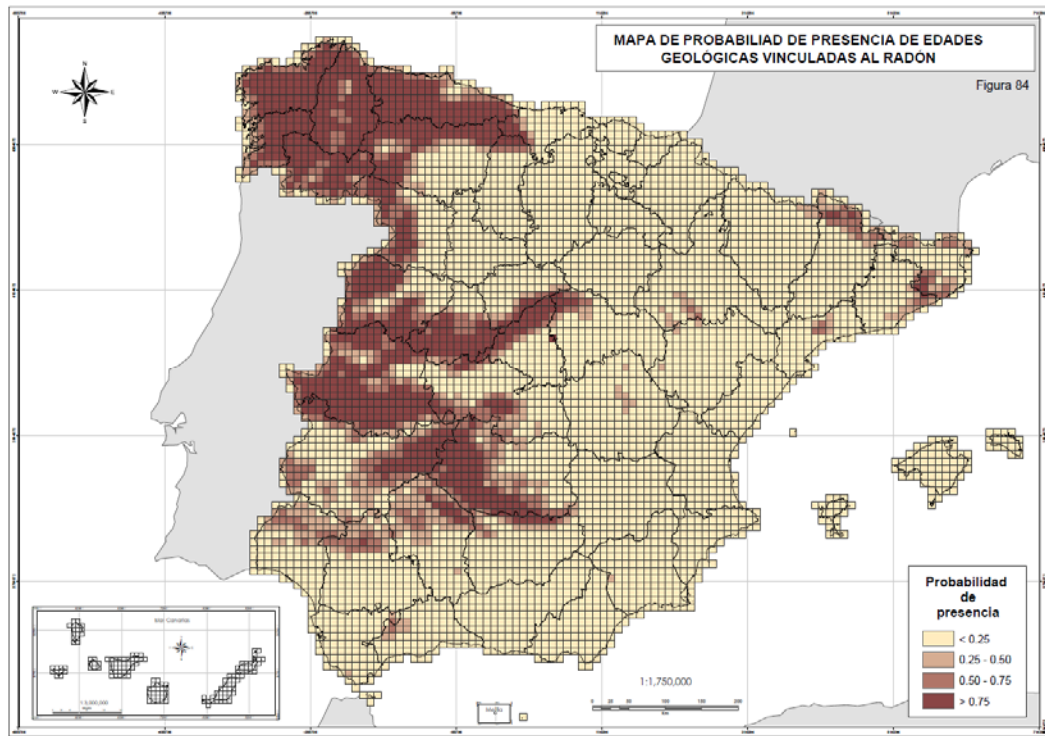


Figura 84: Mapa de probabilidad de presencia de edades geológicas vinculadas con el ^{222}Rn

La correlación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de estas unidades de edad se muestra en la nube de puntos de la figura 85, que indica una tendencia positiva con correlación R de 0.34.

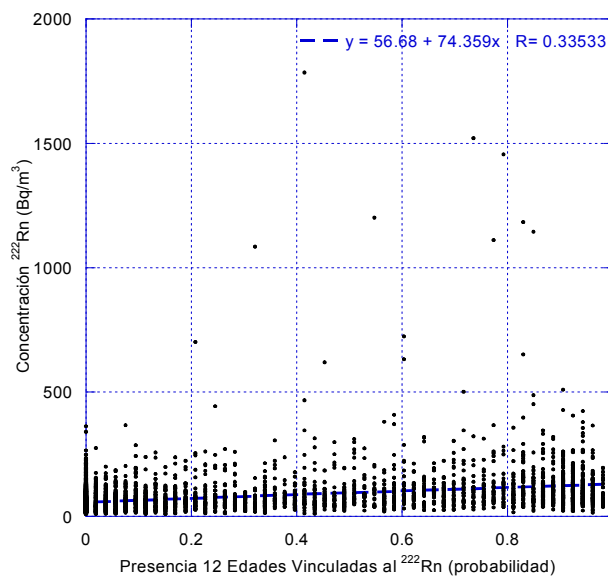


Figura 85: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de las 12 unidades de edad geológica vinculadas al ^{222}Rn .

El análisis de estas 12 unidades de edad según la probabilidad de presencia en los diferentes rangos de concentración de radón refleja los siguientes resultados (tabla 51)

	Presencia de 12 edades vinculadas al ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	17%	46%	67%

Tabla 51: Probabilidad media de presencia de las 12 unidades de edad según los rangos de concentración de ^{222}Rn .

Como se muestra en la tabla, según esta clasificación la probabilidad de encontrar concentraciones de más de 300 Bq/m³ es del 62% y del 51% en el caso del rango de entre 100-300 Bq/m³. Estos datos mejoran los resultados de la clasificación litológica del apartado anterior pero no el basado en las unidades litoestratigráficas.

Al analizar estas 12 clases de edad a partir de las medidas directas de concentración de radón obtenidas en el estudio, de las cuales 4288 se han realizado sobre estas zonas, se comprueba que el porcentaje de medidas en concentraciones superiores a los 300 Bq/m³ es del 10%, lo que mejora los datos de predicción de la clasificación litológica (7%) y de unidades litoestratigráficas (9%).

De estas 12 unidades de edad, se tomaron muestras puntuales, en 11 de las cuales 7 tipos (el 68%) presentan concentraciones superiores a 100 Bq/m³. (Tabla 52)

	Concentración de ^{222}Rn 12 edades vinculadas al ^{222}Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	2435 (57%)	1438 (34%)	415 (10%)

Tabla 52: Concentración de ^{222}Rn en las 12 unidades de edad vinculadas al ^{222}Rn .

En el anexo de tablas se presentan los datos estadísticos de estas 12 clases de edad.

La figura 85 representa estas unidades de edad, atendiendo a tres clases según los cuartiles de los rangos de concentración de radón.

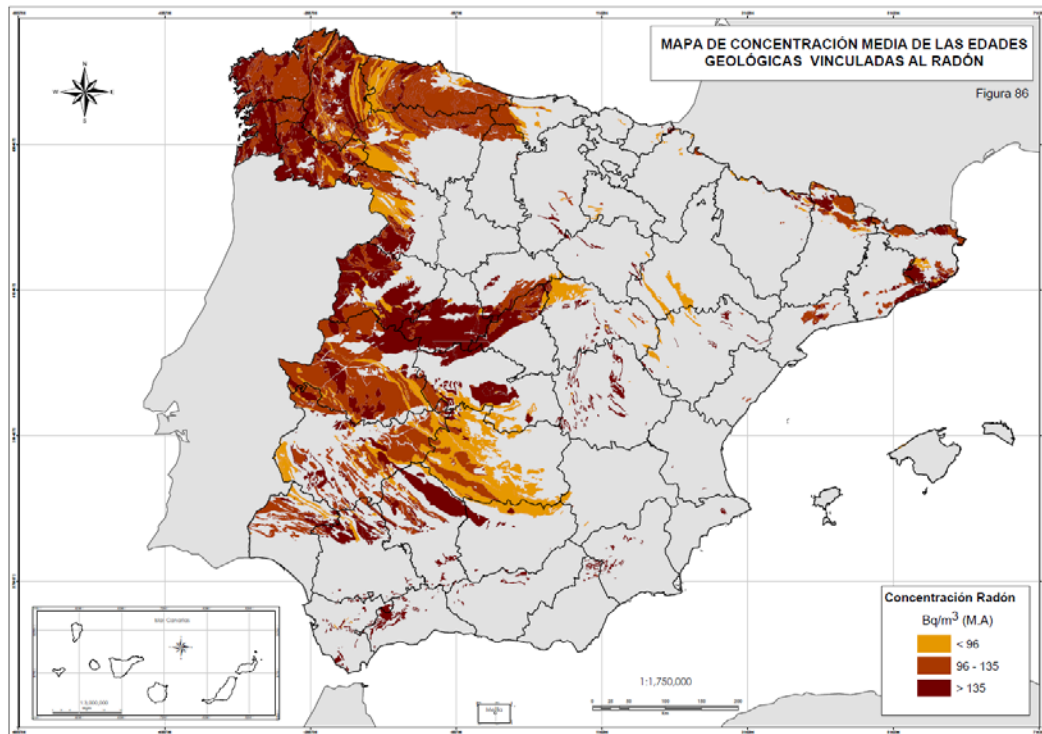


Figura 86: Concentración media de ²²²Rn en las 12 unidades de edad vinculadas al ²²²Rn.

9.3 FORMACIONES SUPERFICIALES Y DEL SUBSTRATO

El mapa de densidades de cada tipo de unidad geológica se cruzó con los datos del modelo de interpolación de radón generado y se obtuvieron 38 unidades (formaciones superficiales y del substrato con vinculación positiva con el radón. (Figura 87).



Figura 87: Mapa vectorial de las 38 unidades geológicas vinculadas con el ²²²Rn.

Mediante la agrupación de estas litologías se creó el mapa de probabilidad de presencia de estas 38 unidades (figura 88).

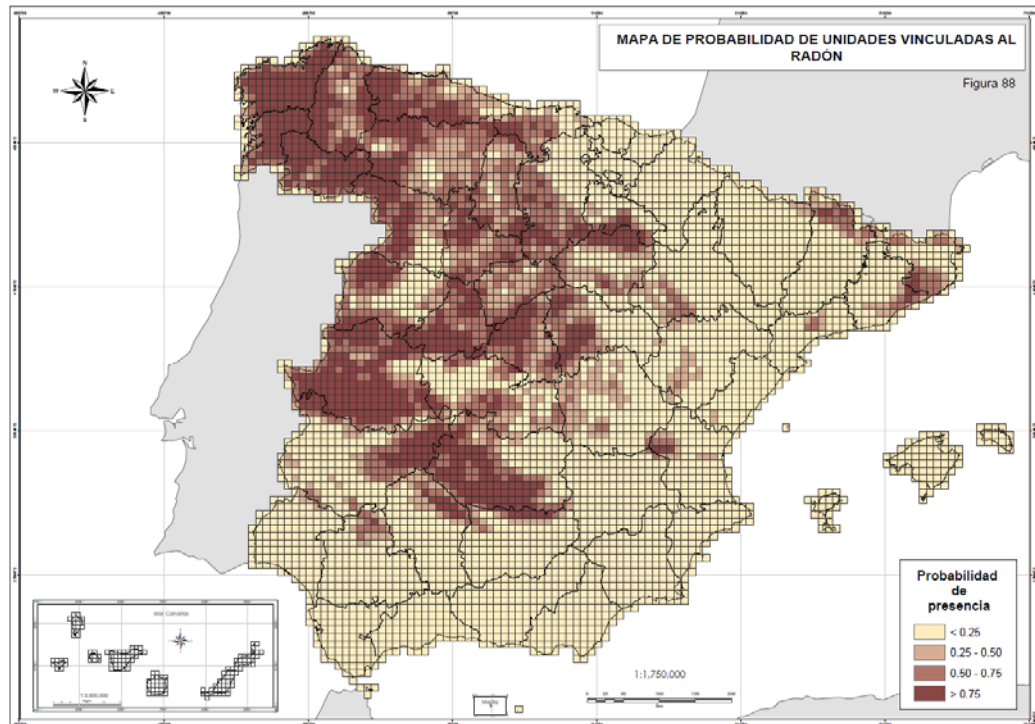


Figura 88: Mapa de probabilidad de presencia de unidades vinculadas con el ^{222}Rn

La relación entre las concentraciones de ^{222}Rn y la presencia de estas unidades se muestra en la figura 89. La nube de puntos indica una tendencia positiva con correlación R de 0.35.

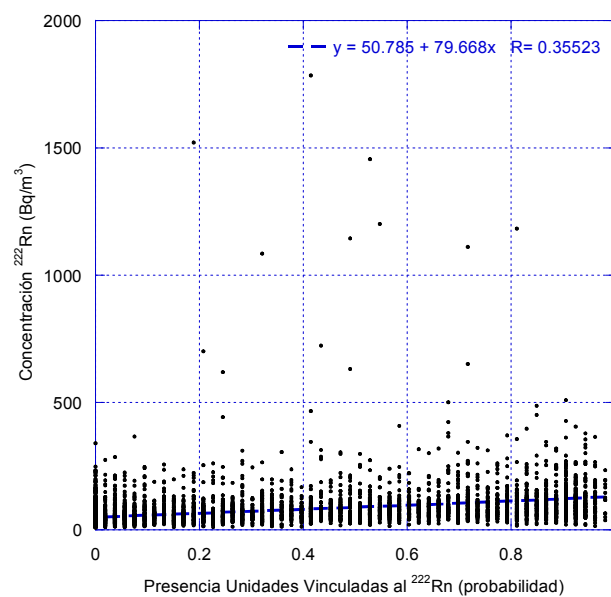


Figura 89: Correlación entre la concentración de ^{222}Rn y la presencia de las 38 unidades geológicas vinculadas con el ^{222}Rn .

Según se aprecia en la figura, la probabilidad de presencia en los diferentes rangos de concentración de radón refleja que con esta clasificación la probabilidad de encontrar concentraciones de más de 300 Bq/m³ es del 64% y del 55% en el caso del rango de entre 100-300 Bq/m³. Estos datos mejoran los resultados de la clasificación litológica y por edades pero no el de la clasificación basada en las unidades litoestratigráficas (tabla 53).

	Presencia de 38 unidades vinculadas al ²²² Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Probabilidad media (%)	23%	55%	64%

Tabla 53: Probabilidad media de presencia de las 38 unidades según los rangos de concentración de ²²²Rn

Para comprobar estos resultados, se analizaron estas 38 unidades geológicas, a partir de las mediciones de concentración de radón, de las cuales 3937 fueron obtenidas sobre estas zonas (tabla 54). El porcentaje de medidas en concentraciones superiores a los 300 Bq/m³ es del 10%, mejorando los resultados de predicción basada en la clasificación litológica (7%) y en la litoestratigráfica (9%) e igualando los de la clasificación por edades.

	Concentración de ²²² Rn 38 unidades vinculadas al ²²² Rn		
	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Nº medidas	2217 (56%)	1342 (35%)	377 (10%)

Tabla 54: Concentración de ²²²Rn en las 38 unidades vinculadas al ²²²Rn

Asimismo, de estas 38 unidades, el 68% presentan concentraciones superiores a 100 Bq/m³. En el anexo de tablas se muestran los datos estadísticos de estas unidades.

En la representación gráfica (figura 90) se representan estos grupos litológicos atendiendo a tres clases según sus cuartiles.

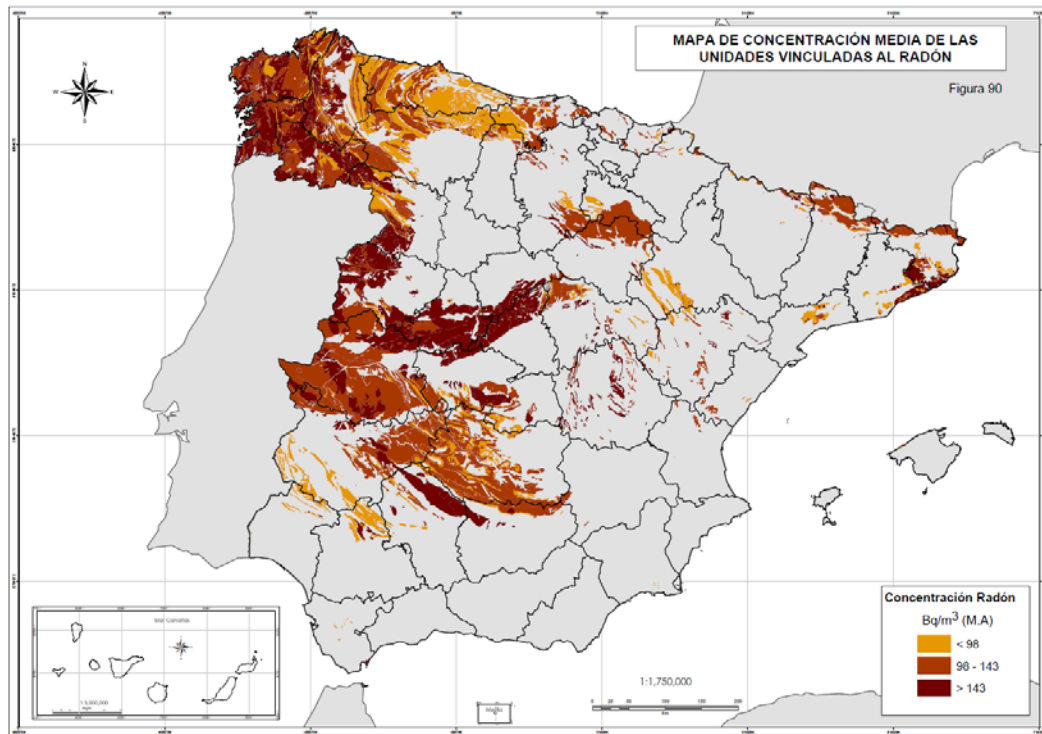


Figura 90: Concentración media de ^{222}Rn en las 38 unidades vinculadas al ^{222}Rn .

Los resultados generales del análisis de la geología de la península a partir del estudio de las unidades litoestratigráficas 1:200,000 y de las unidades geológicas 1:1,000,000 muestran que la escala de análisis es un factor de importancia a la hora de afrontar este tipo de estudios. Es razonable pensar que a una escala de análisis menor (1:1,000,000) se tenga un mayor nivel de acierto en la predicción, pues en esta clasificación geológica se agrupan las unidades en un menor número de categorías y se amplía la superficie de representación de cada unidad geológica. Por el contrario, se pierde resolución espacial en la predicción. La comparación entre las predicciones basadas en la geología y la concentración de radón se ha basado en la comparación de los modelos predictivos con solo tres clases de concentración de radón (<100, 100-300 y >300 Bq/m³) por lo que cualquier mínima variación en la clasificación de una unidad puede provocar un salto de clase. En consecuencia, sería necesario depurar el método de validación en los que basar unas mejores predicciones. Para ello sería necesario disponer también de un muestreo significativo estadísticamente. Por último, es necesario indicar que solo con la litología no será posible obtener modelos de calidad; habrá que integrar otras variables ambientales condicionantes de la concentración de radón en las viviendas.

La clasificación a escala 1:200,000 tiene una mayor resolución espacial (mayor escala), define de forma más precisa la representación de cada unidad litoestratigráficas y, a pesar de tener un mayor número unidades, tiene un nivel de predicción elevado respecto a las concentraciones de ^{222}Rn . Este alto nivel de acierto podría estar asociado a la incorporación por parte del IGME del factor permeabilidad en la agrupación del origen petrológico de estas rocas.

La identificación de unidades litoestratigráficas que estén relacionadas con altas concentraciones de ^{222}Rn se puede afrontar mediante diferentes métodos de trabajo, pero en este estudio se ha centrado en realizar un análisis comparativo entre las unidades litoestratigráficas consideradas propensas a altas concentraciones de radón ([García et al., 2013b](#)) y el análisis de la totalidad de las unidades litoestratigráficas de la península a fin de obtener las que presentasen una vinculación con el radón. Los resultados obtenidos sobre correlaciones, probabilidades y número de medidas realizadas por rangos de concentración (tablas 58-59-60) señalan que el procedimiento de identificación de las unidades litoestratigráficas vinculadas es más efectivo. Pero como se ha citado anteriormente, se asume que este método de identificación por sí solo no es totalmente válido, pues identifica un elevado número de unidades geológicas que no superan los límites de acción recomendados por las instituciones. Por ello, se ha estudiado un método alternativo que combina ambos procedimientos.

Esta combinación identifica de manera más efectiva las concentraciones de radón: la correlación pasa de un $R= 0.29$ a un $R=0.34$. Respecto a la capacidad predictiva respecto a la probabilidad media de presencia en las concentraciones más elevadas ($>300 \text{ Bq/m}^3$) se pasa de un 56% a un 59%, y en las medias ($100\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$) de un 42% a un 47%. Al analizar los datos de medidas de concentración de ^{222}Rn realizadas en estas litoestratigrafías se comprueba el aumento de identificación en las mayores concentraciones (pasa del 9% al 10%). (Tablas 55-56-57).

VARIABLE	R
Litoestratigrafías 1:200.000 Potenciales al ^{222}Rn (40)	0.29
Litoestratigrafías 1:200.000 Vinculadas al ^{222}Rn (107)	0.41
Litoestratigrafías 1:200.000 Relacionadas al ^{222}Rn (63)	0.34
Litologías 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (9)	0.24
Edades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (12)	0.34
Unidades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (38)	0.36

Tabla 55: Correlación entre concentración de ^{222}Rn de las unidades vinculadas al ^{222}Rn .

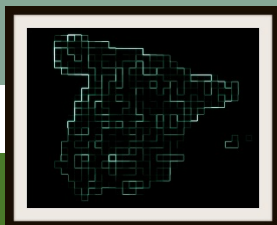
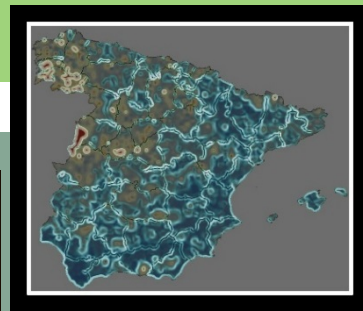
Probabilidad media (%)	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Presencia 40 Litoestratigrafías Potenciales al ^{222}Rn	0.17	0.42	0.56
Presencia 107 Litoestratigrafías vinculadas al ^{222}Rn	0.21	0.59	0.71
Presencia 63 Litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn	0.20	0.47	0.59
Presencia 9 Litologías vinculadas al ^{222}Rn	0.30	0.51	0.62
Presencia 12 Edades vinculadas al ^{222}Rn	0.17	0.46	0.67
Presencia 38 Unidades vinculadas al ^{222}Rn	0.23	0.55	0.64

Tabla 56: Probabilidad media de presencia de unidades según los rangos de concentración de ^{222}Rn .

Nº medidas	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Concentración de ^{222}Rn 40 litoestratigrafías potenciales al ^{222}Rn	2193 (57%)	1277 (33%)	358 (9%)
Concentración de ^{222}Rn 107 litoestratigrafías vinculadas al ^{222}Rn	2729 (57%)	1550 (33%)	414 (9%)
Concentración de ^{222}Rn 63 litoestratigrafías relacionadas con ^{222}Rn	2413 (57%)	1422(33%)	412 (10%)
Concentración de ^{222}Rn 9 litologías vinculadas al ^{222}Rn	3825 (65%)	1655 (28%)	426 (7%)
Concentración de ^{222}Rn 12 edades vinculadas al ^{222}Rn	2435 (57%)	1438 (34%)	415 (10%)
Concentración de ^{222}Rn 38 unidades vinculadas al ^{222}Rn	2217 (56%)	1342 (35%)	377 (10%)

Tabla 57: Concentración de ^{222}Rn en unidades vinculadas al ^{222}Rn .

CONCLUSIONES



4

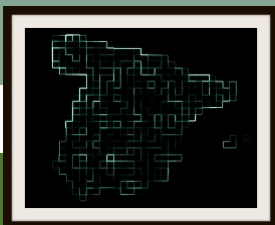
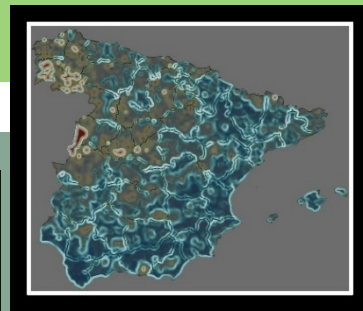
CONCLUSIONES

- En el presente trabajo, se ha comprobado que utilizar la tasa de exposición gamma procedente del proyecto MARNA como único identificador de zonas propensas al radón puede ser efectivo como primera aproximación para identificar la posible concentración de radón de un área pero también puede llevar a estimaciones erróneas pues agrupa los datos de las contribuciones del ^{40}K y ^{232}Th que no contribuyen a la presencia del gas radón en las viviendas.
- Siguiendo los criterios marcados por Europa, se ha elaborado un Mapa Español del Radón basado en las medidas directas de concentración de ^{222}Rn realizadas en diferentes campañas de medidas en el territorio nacional. El mismo se desarrolló mediante técnicas geoestadísticas a partir del análisis espacial de los valores de una serie de variables que se encuentran asociadas a la potencial presencia de gas radón.
- Los resultados obtenidos de concentración de ^{222}Rn a partir de las medidas directas reflejan que una parte de la superficie de España (el 24%) en donde reside el 21% de la población española supera los límites recomendados por la OMS como nivel de referencia para iniciar planes de acción, y que el 2% del territorio en donde habita el 0.75 % de la población se encuentran en las zonas identificadas de mayor riesgo donde se supera el nivel de referencia de los 300 Bq/m^3 indicado en la Directiva 2013/59/EURATOM.
- Sólo el 16% del territorio nacional se encuentra cubierto con más de 6 medidas en el sistema europeo de celdas $10 \times 10 \text{ km}^2$ según solicita la UE. De ahí la importancia de incrementar el número de mediciones, a fin de tener una base estadística aceptable por unidad de superficie, sobre todo en las zonas previamente identificadas con concentraciones superiores a los 100 Bq/m^3 .
- Dado que no todo el territorio nacional se cubrió de manera directa con al menos una medida, se realizó una interpolación de los datos en las celdas en las que no

existía medición. A partir de este mapa interpolado se analizaron las diferentes variables y se elaboraron los resultados que se presentan en esta tesis.

- Parte del estudio de las diferentes litologías de la península se realizó analizando las litoestratigrafías a escala 1:200,000 y las unidades geológicas a escala 1:1,000,000. Los datos obtenidos muestran que la escala de análisis es un factor de importancia a la hora de afrontar este tipo de estudios.
- La clasificación 1:200,000 tiene una mayor escala y define de forma más precisa la litoestratigrafía, con un mayor número de clases y un nivel de predicción más elevado respecto a las concentraciones de ^{222}Rn . Este alto nivel de acierto está también asociado a la incorporación por parte del IGME del factor permeabilidad en la agrupación de estas rocas.
- De manera general se observa que las celdas con mayores concentraciones de radón ($>100 \text{ Bq/m}^3$) se corresponden al dominio del Macizo Ibérico en donde predominan las rocas silíceas: Son las formaciones graníticas del Sistema Central (Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila), el Macizo Galaico-Portugués, y la zona oeste de Salamanca y Zamora junto con áreas puntuales de Badajoz, Córdoba o Gerona. Esta correspondencia con altas concentración también se observa en las zonas metamórficas del oeste de península y en parte del Sistema Ibérico. Las celdas de menores concentraciones ($< 100 \text{ Bq/m}^3$) aparecen en zonas sedimentarias en las que predominan las rocas detríticas (cuencas del Duero, Tajo, Ebro y Guadalquivir), y rocas carbonatadas (principalmente en los relieves alpinos de Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico y parte de las Béticas).
- A la escala de observación empleada en los mapas utilizados, se ha comprobado que la aparición de altas concentraciones de ^{222}Rn en el interior de las edificaciones está asociada a la combinación de múltiples factores que, de manera individual, no son suficientes para predecirlas.
- Dando continuidad a este trabajo de tesis doctoral, en el futuro próximo se pretenden perfeccionar y refinar los análisis efectuados con el aporte de más medidas que permitan poder definir con mayor precisión las zonas de riesgo potencial al radón.

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

([Agua y SIG, 2016](#)). Online at: <http://www.aguaysig.com/2011/03/geoestatistical-analyst-analisis.html>.

([Arribas, A. 1975](#)). ARRIBAS, A. 1975. Caracteres geológicos de los yacimientos españoles de uranio. (Su importancia económica e interés en el desarrollo energético del país). Stvd. Geol., 9; 7-6. Online
at:file:///C:/Users/UsuarioUC/Downloads/bg_120517.pdf

([Bastida, F, 2005](#)). Bastida, F. 2005. Geología, una visión moderna de las ciencias. Ediciones TREA,S.L. Gijón. ISBN: 9788497042017

([Boseew et al, 2015](#)). Bossew, P., Tollefsen, T., Cinelli, G., Gruber, V., De Cort, M., 2015. Status of the European atlas of natural radiation. Radiat. Prot. Dosim. 101 (1e3).

([Carretero, M.I. et al., 2007](#)). Carretero, M.I.; Pozo, M. (2007).- Mineralogía Aplicada. Salud y Medioambiente. Ed.Thomson. Madrid.

([Chung, 1983](#)). Chung, C.F. 1983. Integrated computer system for use in evaluation of mineral and energy resources. Mathematical Geology, Vol. 15: 1: 47-58.

([Coppens, R, 1963](#)). Coppens, Rene, 1963. La radiactividad de las rocas. Titulo original "La radioactivite des roches" Ed. Eudeba. Buenos Aires. Col. Cuadernos de Eudeba nº 94, rustica.

([CSN, 1998](#)). CSN, 1998. Measures of Radon in Spanish Homes. Collection Other Documents 6.1998. ISBN 84-87275-76-1. Online at:
https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/otros_documentos/ode-04.02_radon.pdf.

([CSN 2012a](#)). CSN, 2012a. Safety Guide 11.02. Control of Exposure to Natural Sources of Radiation. Online at:
https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/guias_seguridad/gs-11-02ok.pdf.

(CSN, 2012b). CSN, 2012. Instruction IS-33. Radiological Criteria from Exposure to Natural Radiation.

(CSN, 2017). CSN, 2017. Mapa del potencial de radón en España. Online at: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>

(Darby, S et al., 2006). Darby S, Hill D, Aivinen A, Barros-Dios J.M, Bausson H. 2006, Residential radon and lung cancer-detailes results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. Scan J Work, Environ and Health.;32 (Suppl 1):1-84.

(De Cort et al, 2011). De Cort, M., Gruber, V., Tollefsen, T., Bossew, P., Janssens, A., 2011. Towards a European atlas of natural radiation: goal, status and future perspectives. Radioprotection 46, 6.

(Dimitroulopoulou, C, 2012). C. Dimitroulopoulou, Ventilation in European dwellings: A review Building and Environment 47 (2012) 109-125

(Dubois, G., 2005). Dubois, G., 2005. An Overview of Radon Surveys in Europe. European Commission. Joint Research Centre. EUR21892EN. PUBSY 1429. ISBN 92-79-01066-2

(Dubois et al., 2010). Dubois, G., Bossew, P., Tollefsen, T., De Cort, M., 2010. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. J. Environ. Radioact. 101, 786e798.

(EPA, 2017). United States Environmental Protection Agency. Online at: <https://www.epa.gov/radon/epa-map-radon-zones>

(ESRI, 2016). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS. 2016. Online at: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/comparing-interpolation-methods.htm>

(EURATOM, 1990). EURATOM, 1990. Commission Recommendation of 21February 1990 on the Protection of the Public Against Indoor Exposure to Radon. European Commission,90/143/Euratom.

(EURATOM, 1996). EURATOM, 1996. Council directive 96/29/Euratom of 13 May 1996, laying down basic safety standards for the protection of health of workers and the general public against the danger arising from ionizing radiation. Off. J. Eur. Comm.L159.

(EURATOM, 2013). EURATOM, 2013. Council Directive (2013/59/Euratom) on Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation.

(FOREGS, 2016). FOREGS-EuroGeoSurveys. Geochemical Atlas of Europe. Online at:http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/maps_table.php

(Frutos, B et al., 2014). Frutos Vázquez, B.; Martín Consuegra, F., Olaya Adán, M; Sainz Fernández, C., 2014. Técnica de ventilación como medida de rehabilitación frente a la inmisión de gas radón en edificios y su repercusión en la eficiencia energética. Congreso Latinoamericano Rehabend 2014.

(Hoek, E et al., 1981). Hoek, E; Bray, J.W (1981), Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy. London, 3º Ed.

(Hudson, J.A, et al., 2000). Hudson, J.A, Harrison J.P (2000) Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Pergamon. ISBN: 0-08-041912-7

(García et al., 2013a). García Talavera, M., Matarranz, J.L., Gil, R., García, J.P., Suárez, E., 2013a. Predictive Map of Exposure to Radon in Spain. CSN. Ref: INT-04.31.

(García et al., 2013b). García Talavera, M., García Pérez, A., Rey, C., Ramos, L., 2013b. Mapping radon-prone areas using radiation dose rate and geological information. J. Radiol. Prot. 33,605e620. Online at:stacks.iop.org/JRP/33/605.

(González-Díez et al. 2009), A. González-Díez, J. Soto, J. Gómez-Arozamena, J. Bonachea, J.J. Martínez-Díaz, J.A. Cuesta, I. Olague, J. Remondo, G. Fernández Maroto, J.R. Díaz de Terán (2009). Identification of latent faults using a radon test. Geomorphology, 110: 11–19.

(Gutiérrez-Villanueva, 2011). Gutiérrez-Villanueva, J.L., Sainz Fernández, C., Fuente Merino, I., Quindós López, L., Quindós López, J., Fernández Villar, A., Casal Ordas, S.E., López Abascal, D.,Arteche Laso, D., Fernández López, E., Quindós Poncela, L.S., 2011. International Intercomparison Exercise on Natural Radiation Measurements Under Field Conditions. ISBN 9788486116644.

(Gutiérrez-Villanueva, 2015). Gutiérrez-Villanueva, J.L., Sainz Fernández, C., Fuente Merino, I., Celaya González, S.,Quindós López, L., Quindós López, J., Fernández Villar, A., Casal Ordas, S.E., López Abascal, D., Arteche Laso, D., Fernández López, E., Quindós Poncela, L.S., 2015. Inter-laboratory Comparison on Indoor Radon Measurements Under Field Conditions. ISBN 9788486116910.

(IAEA, 2011). IAEA “Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards” (2011)

(IARC, 1988). IARC, International Agency for Research on Cancer, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 43, Man-made Mineral Fibres and Radon, Lyon (1988).

(ICRP, 1993). ICRP 65 “Protection against radón-222 at home and at work” (1993)

(ICRP, 1994). ICRP, 1994. Human respiratory tract 1532 model for radiological protection, ICRP publication 66. Ann. ICRP 24.

(ICRP, 2009). ICRP, 2009. ICRP Statement on Radon (ICRP/Ref 00/902/09)

(ICRP, 2010). ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny. ICRP publication 115, part 1. Ann. ICRP 40.

(ICRP, 2011). ICRP, 2011. ICRP Draft Report for Consultation. Ref 4829-9671-6554.

(ICRP, 2014). ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure, ICRP publication 126. Ann. ICRP 43.

(IGME, 2014a). Geological and Mining Institute of Spain. Online at:
http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME_Litoestratigrafico200.

(IGME, 2014b). Geological and Mining Institute of Spain. Online at:
<http://info.igme.es/cartografia/oneGeology.asp?mapa¼oneGeologyEuropa>.

(IGME, 2016). Geological and Mining Institute of Spain. Online at:

<http://doc.igme.es/bdmin/buscarIndicio.aspx>

(IGME, 2016a). Geological and Mining Institute of Spain. ESP IGME 1:1M Faults.

Online at:

http://mapas.igme.es/gis/rest/services/oneGeology/ESP_1M_IGME_1GEGeology_EN/MapServer

(IGME, 2016b). Geological and Mining Institute of Spain. IGME_Arcillas_1M.

Online at:

http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Tematica/IGME_Karst_1M/MapServer/WMServer

(IGME, 2016c). Geological and Mining Institute of Spain. IGME_Cuaternario_1M.

Online at:

http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Tematica/IGME_Cuaternario_1M/MapServer/WMServer

(IGME, 2016d). Geological and Mining Institute of Spain. IGME_Karst_1M.

Online at:

http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Tematica/IGME_Karst_1M/MapServer/WMServer

(IGN, 2014). IGN, 2014. Spanish National Geographic Institute. Online at:

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/equipamiento.do;jsessionid¼C2800EC111853C3AF346D382336>

(INE, 2014). INE, 2014. Spanish National Institute of Statics. Online at:

<http://www.ine.es/nomen2/index.do?accion¼busquedaRapida&subaccion¼&numPag¼0&ordenAnios¼ASC&nombrePoblacion¼huesa%2Bdel%2Bcom%FAn& botonBusquedaRapida¼Consultar%2Bselecci%F3n>

(JRC-EC, 2010). Joint Research Centre. European Commission. Online at:

<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/gisco-database-manual-part-1-chapter-3>

(Kemski et al., 2001). Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Sci. Total Environ.* 272, 1e3

(Kemski, et al., 2009). Kemski J, Klinger R, Siehl A, Valdivia-Manchego M (2009). From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. *Environmental Geology*. 2009. 56:1269–1279. doi: 10.1007/s00254-008-1226-

(Keller et al., 2001). Keller, G., Hoffmann, B., and Feigenspan, T. (2001). "Radon permeability and radon exhalation of building materials," *Sci. Total Environ*. 272, 85–89.

(Litología, 2016). Online at:

<http://www.iesrdelgado.org/Alumnos/w2015/geografia1/litologia.html>

(Martín Matarranz, J.L., 2004). Martín Matarranz, J.L., 2004. Concentrations of Radon in Spanish Homes. Other Studies of Natural Radiation. Technical Reports Collection. CSN.

(Menor Salván, C; 2013). Menor Salván, C, 2013. La radiactividad natural y los minerales radiactivos. Escuela de Minas. UPM.

(Moreno, A, 2008). Moreno Jimenez, A. 2008. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. 2a. Edición. RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones. ISBN: 8478978380.

(Nazaroff, W.W and Nero, A.V, 1988). NAZAROFF, W. W. & NERO, A. V. 1988. Radon and its decay products in indoor air, United States, John Wiley and Sons Inc., New York, NY.

(Neznal, el al., 2004). Neznal, M; Matolin, M; Günther, J; Turkey, K. Short-term temporal variations of soil gas radón concentration and comparison of measurement techniques. 2004. *RadiatProt Dosimetry*. On line: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch004>

(NRPB; 1981). Living With Radiation. 1981. NRPB. ISBN 10: 0859511456

(Pérez del Villar, L., et al 1989). L. Pérez del Villar, C.Moro.1989. Los yacimientos peribatolíticos de uranio encajados en metasedimentos: comparación con los del área de Acehucho-Ceclavín (Provincia de Cáceres). *Studia Geologica Salmanticensia*, XXVI, 135-161. On line:
https://gedos.usal.es/jspui/bitstream/10366/79796/1/Los_yacimientos_peribatoliticos_de_urani.pdf

(Peña, J, 2006). Peña Llopis, J. 2006. *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Editorial Club Universitario. ISBN: 8484544931

(PHE, 2017). PHE, 2017. *Public Health England*. Online at:
<http://www.ukradon.org/information/ukmaps>

(Pozo Rodríguez et al., 2008). Pozo Rodríguez, M.;Wicander, R; Monroe, J.S. 2008. *Geología. Dinámica y evolución de la tierra*. Ed. Paraninfo. ISBN: 8497324595

(Quindós et al., 1992). Quindós Poncela, L.S; Soto, J; Fernández L., 1992. Geología y niveles de radón en viviendas españolas. *Revista española de física*, ISSN 0213-862X, Vol. 6, Nº. 1, 1992, págs. 35-37.

(Quindós Poncela, L.S; 1995). Quindós Poncela, L.S, 1995. *Radón un gas radiactivo de origen natural en su casa*. CSN-UC. ISBN: 84-8102-114-8.

(Quindós et al, 2004). Quindós, L.S., Fernández, P.L., Gomez Arozamena, J., Sainz, C., Fernández, J.A., Suarez Mahou, E., Martin Matarranz, J.L., Cascón, M.C., 2004. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environ. Int.* 29.

(Quindós et al 2008). Quindós, L.S., Fernández, P.L., Sainz, C., Fuente, I., Nicolás, J., Quindós, L., Arteché, J.,2008. Indoor radon in a Spanish region with different gamma exposure levels. *J. Environ. Radioact.*

(Rengifo et al., 2015). Rengifo, M., Aranguren, R., Lafaille, J., Ferrer, C., y Audemard, F. 2015. Medición de gas radón en un segmento de la Falla de Boconó, estados Táchira y Mérida. *Boletín de Geología*, 37 (2): 57-74.

(Sainz et al., 2009). Sainz C, Dinu A, Dicu T, Szacsvai K, Quindós LS, Cosma C, Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radon - prone areas, Stei (Romania) and Torrelodones (Spain), Science of The Total Environment, (2009).

(Sainz et al, 2014). Sainz Fernández, C., Fernández Villar, A., Fuente Merino, I., Gutiérrez-Villanueva, J.L., Martín Matarranz, J.L., García Talavera, M., Casal Ordas, S., Quindós Poncela, L.S., 2014. The Spanish indoor radon mapping strategy. Radiat. Prot. Dosim. 162 (1e2), 58e62.

(Suarez et al., 1997). Suarez Mahou, E., Fernandez, J.A., 1997. Project MARNA: Natural Gamma Radiation Map.

(Suarez et al., 2005). Suarez Mahou, E; Fernández Amigot, J.A; García Pomar, D, 2005. IV WORKSHOP “Radiación natural y medio ambiente”. Proyecto MARNA. Suances, 4 al 8 de Julio de 2005. UC.

(Suárez et al, 2000). Suárez Mahou, E., Fernández Amigot, J.A., Baeza Espasa, A., Moro Benito, M.C., García Pomar, D., Moreno del Pozo, J., Lanaja del Busto, J.M., 2000. Marna Project. Map of Natural Gamma Radiation. Technical Reports Collection. CSN.

(Schumann,R.R et al., 1994). SCHUMANN, R. R., GUNDERSEN, L. C. AND TANNER, A. B. 1994. Geology and Occurrence of Radon. Radon, 83.

(Tarbuck and Lutgens, 2005). Tarbuck y Lutgen, 2005. Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Pearson, Prentice Hall. Madrid. 710 pp.

(Tollefsen et al, 2011). Tollefsen, T., Gruber, V., Bossew, P., De Cort, M., 2011. Status of the European indoor radon map. Radiat. Prot. Dosim. 145.

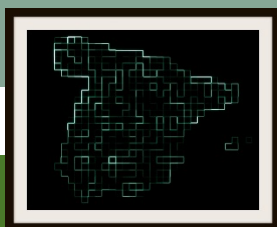
(Tollefsen et al., 2014). Tollefsen, E., Cinelli, G., Bossew, P., Gruber, V., De Cort, M., 2014. From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation. Radiat. Prot. Dosim. 162, 1e2.

(UNSCEAR, 2000). UNSCEAR 2000 Report on Sources and Effects of Ionizing Radiation to the General Assembly (2 Volumes), United Nations, Vienna (2000).

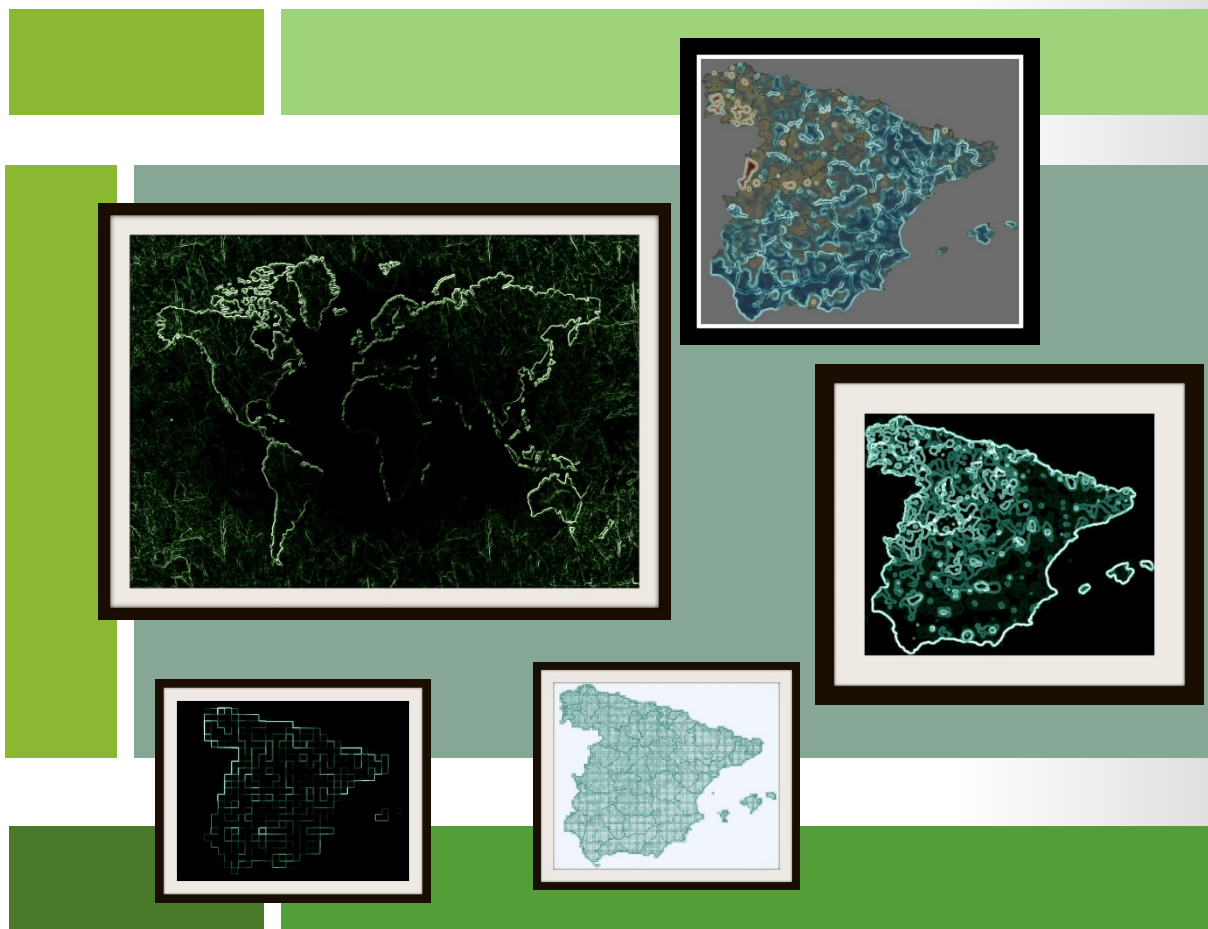
(U.V, 2016). Universitat de Valencia. Online at:
<http://www.uv.es/~friasnav/CorrelacionRegresion.pdf>

(WHO, 2009). WHO Handbook on Indoor Radon (2009).

ANEXOS



ANEXO NORMATIVA



NORMATIVA

1.1

NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL

1.1.1 NORMATIVA COMUNITARIA RELACIONADA CON LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

1. Directiva 89/106/CEE Relativa a Productos de Construcción (1989)

Hace referencia a que el medioambiente interior debe de ser saludable teniendo en cuenta a los contaminantes como el radón y sustancias radiactivas que emitan radiaciones gamma.

2. Recomendación 90/143/EURATOM relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios (1990)

Se emiten recomendaciones para viviendas nuevas como para nuevas edificaciones: El nivel de referencia a partir del cual se deben considerar acciones de remedio en viviendas ya edificadas es de 400 Bq/m³de concentración media anual (20mSv/año). En futuras construcciones el nivel de diseño será de 200 Bq/m³(10mSv/año).

Se hace referencia a la importancia de informar al público de los niveles a los que están expuestos y los medios existentes para reducirlos.

Las medidas realizadas deben de tener un control de calidad supervisadas por las autoridades competentes.

Se añade la importancia de establecer unos criterios de identificación de las zonas de riesgo.

3.Directiva Europea 96/29/EURATOM relativa a las normas básicas en protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resulten de las radiaciones ionizantes(1996) :Art 2 “Esta directiva no se aplicará a la exposición de radón en las viviendas o a los niveles naturales de radiación”.

4. Directiva Europea 2013/59/EURATOM por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes(2013)

Dentro del ámbito de aplicación incluye varios artículos referidos a la protección radiológica frente al radón en recintos cerrados identificando la exposición prolongada al radón en interiores con el riesgo de padecer cáncer de pulmón (Art 22): *“Los descubrimientos epidemiológicos recientes de los estudios residenciales demuestran que existe un mayor riesgo estadísticamente significativo de padecer cáncer de pulmón derivado de la exposición prolongada al radón en recintos cerrados a niveles del orden de 100 Bq m⁻³. El nuevo concepto de las situaciones de exposición permite incorporar las disposiciones de la Recomendación 90/143/Euratom de la Comisión (1) a los requisitos vinculantes de las normas básicas de seguridad, al tiempo que permite suficiente flexibilidad en su aplicación”*

Es por ello que hace hincapié en la necesidad de que los estados miembros establezcan niveles de referencia por debajo de los 300 Bq/m³ de promedio anual de concentración de radón en aire (Art74-1): *“Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superarán los 300 Bq m⁻³”.*

Además indica la necesidad de establecer Planes de Acción Nacionales para identificar las viviendas que superen el nivel de referencia y adoptar medidas para reducir la concentración (Art 23 y 74-2): *“Es necesario contar con planes de acción nacionales para abordar los riesgos a largo plazo de la exposición al radón”(Art 23). “Con arreglo al plan de acción nacional, los Estados miembros fomentarán la adopción de medidas para identificar aquellas viviendas donde el promedio anual de concentraciones de radón supere el nivel de referencia y fomentarán, cuando proceda, la adopción de medidas para reducir la concentración de radón en dichas viviendas por medios técnicos o de otro tipo”(Art 74-2).*

Y se señala que los Estados garantizarán que se facilite información a nivel local y nacional relativa a la exposición al radón y sus riesgos para la salud (Art 74-3): *“Los Estados miembros garantizarán que se facilite la información local y nacional relativa a la exposición al radón en recintos cerrados y a los riesgos asociados para la salud, así como sobre la importancia de efectuar medidas de radón y sobre los medios técnicos disponibles para reducir las concentraciones de radón existentes”.*

Esta directiva tiene un plazo de transposición de cuatro años para que los Estados Miembros pongan en vigor las disposiciones (fecha límite 6 febrero 2018). Además

indica que los estados miembros deberían incluir en sus Códigos Técnicos de Edificación la problemática del radón

1.1.2 NORMATIVA ESPAÑOLA RELACIONADA CON LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

1. R.D 783/2001 Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes se transpone la Directiva Europea 96/29/EURATOM pero en su artículo 2 dejaba claro que *“no se aplicará este reglamento a la exposición al radón en viviendas o a los niveles naturales de radiación”*

2. R.D 1439/2010: Regula la exposición al radón y sus descendientes en los lugares de trabajo, pero no aplica a la exposición de radón en viviendas

3. Instrucción CSN IS-33 (2011) sobre criterios radiológicos para la para la protección frente a la exposición a la radiación natural:Se regula exposición al radón en lugares de trabajo pero no en viviendas

4. Guía de Seguridad 11.2 “Control de la exposición a fuentes naturales de radiación” (2012)

Sigue las recomendaciones de la Unión Europea: Para edificios ya construidos se indican medidas de remedio a partir de 300 Bq/m³ aunque se considera la iniciación de medidas de remedio sencillas a partir de los 100 Bq/m³. Para nuevas construcciones el nivel de diseño 100 Bq/m³

5. CTE Código Técnico de la Edificación: No existe a día de hoy ningún requerimiento en cuanto a la protección al radón en edificios. Se propuso incluir el siguiente texto *“El diseño y la construcción del edificio, se llevarán a cabo de manera que se asegure que los ocupantes no estén expuestos a unas concentraciones de radón que puedan implicar un riesgo para la salud”*. Desgraciadamente estas propuestas no han sido incluidas oficialmente en las CTE.

1.2

RECOMENDACIONES

Debido a la ausencia de una normativa clara en España sobre el radón en el interior de las edificaciones, en el presente apartado se hace referencia a una serie de recomendaciones emitidas por diferentes organismos internacionales sobre protección radiológica como la IAEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica), la NEA (Agencia para la Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica). La UNSCEAR (Comité Científico sobre los Efectos de la Radiación Atómica de las Naciones Unidas), o la EURATOM (Comunidad Europea de la Energía Atómica)

La ICRP, UNSCEAR, EURATOM son Organismos de Asesoramiento y consulta que emiten informes y recomendaciones que son tenidas en cuenta por parte de los Organismos Internacionales para emitir normas que posteriormente serán incorporadas a los reglamentos nacionales e internacionales.

La IAEA y la NEA son los Organismos Internacionales que adaptan y desarrollan los informes de los Organismos de Asesoramiento que serán la base en los que se apoyen las autoridades de cada país para desarrollar la normativa.

1.2.1 RECOMENDACIONES DE LA ICRP

1. ICRP 39 “Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation”(1984) Señala al radón como fuente de exposición natural dominante situando el nivel de acción de 200 Bq/m³ para una exposición existente en viviendas ya edificadas y en viviendas de nueva construcción un nivel de referencia de 100 Bq/m³

2. ICRP 60 “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ”(1990) Sigue señalando al radón como fuente de exposición natural dominante manteniendo los niveles de acción y referencia de la ICRP 39. Se da un valor de dosis (*conversion conventions factors*) 200 Bq/m³ se corresponden a 10 mSv.

3. ICRP 65 “Protection against radón-222 at home and at work”(1993) Emite recomendaciones para controlar la exposición al radón en viviendas y lugares de trabajo.

El nivel de acción en viviendas se sitúa entre 200-600Bq/m³ indicando que las nuevas construcciones deberán de ser diseñadas para que las concentraciones sean tan bajas como sea posible (ALARA) y se considere la posibilidad de incorporar técnicas para reducir estas.

Se modifican los valores de dosis para concluir que 200 Bq/m³ se corresponden a 3 mSv.

Se introduce el concepto “*Radón Prone Areas*” o zonas en la que es más probable en las que se encuentren altas concentraciones de radón. Tales áreas serán aquellas en las que más de 1% de las viviendas tengan concentraciones superiores de radón diez veces superiores al valor medio nacional. Además se indica la prioridad de acometer acciones en dichas áreas para disminuir las concentraciones.

4. ICRP 82 “Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure”(2001). Se siguen considerando las recomendaciones de la ICRP 65

5. ICRP 103 “The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection” (2007)

Expone que “*las autoridades nacionales deberían establecer niveles de referencia nacionales como una ayuda a la optimización de la protección de la exposición al radón*”.

Continúa con 3-10 mSv como valor de dosis efectiva por año que convertido a concentración es entre 200-600Bq/m³

Se considera “*la necesidad de una acción para limitar la exposición al radón en las viviendas*” (Art 292) delegando la responsabilidad de acción a sus propietarios.

También continúa con la idea de definir áreas propensas al radón.

6. ICRP Ref00/902/09 “Statement on Radon”(2009)

Se continúa con el factor de conversión de dosis de 200 Bq/m³ que se corresponden a 3 mSv hasta que se emitan nuevos resultados, informando que es probable que este factor se aumente en siguientes publicaciones.

Se plantea elevar el nivel de referencia en viviendas de la ICRP 65 a 300 Bq/m³ (dosis efectiva anual 12-17 mSv) indicando que los países deberán considerar los niveles de referencia tan bajos como les sea razonablemente posible para reducir la

concentración de radón en las viviendas por debajo del nivel de referencia nacional. Esta recomendación es similar a las propuestas por la OMS (2009).

7. ICRP 115 “Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon”(2010)

Nivel de referencia en viviendas 300 Bq/m³

8. ICRP Ref 4829-9671-6554 “Draft report for consultation: Radiological Protection against Radon Exposure”(2011)

Se deja en manos de las autoridades nacionales la puesta en marcha de los planes de actuación contra el radón, que deberá implementarse tanto de manera preventiva en nuevas edificaciones como de manera correctora en edificaciones existentes.

Se eleva el nivel de referencia en vivienda a 300 Bq/m³ de concentración media anual.

9. ICRP 126 “Radiological Protection against Radon Exposure” (2014)

Se expone que el riesgo relativo de contraer de cáncer de pulmón aumenta de forma acumulativa por la exposición al radón en un 10% por cada 100 Bq/m³ que se incremente la concentración.

Se expone que existe un riesgo significativo a partir de exposiciones de 200 Bq/m³

El nivel de referencia en viviendas 300 Bq/m³ (dosis efectiva anual 12-17 mSv)

10. ICRP Ref 4821-2831-8499 “Main Commission Meeting”(2015)

Se avanza que en próximas publicaciones se modificará el coeficiente de riesgo nominal de exposición al radón a 12 mSv/WLM para público en general.

*NOTA :

WLM (WorkingLevelMonth) : 1WLM es una exposición de 1WL en un mes (170 horas).

La exposición media anual al gas radón en viviendas es de 230 Bq/m³ = 1WLM

1WL (WorkingLevel) es cualquier combinación de los productos de decaimiento de vida corta en un litro de aire que emitan 1.3×10^5 MeV de energía alfa

1.2.1 RECOMENDACIONES DE LA IAEA

1. IAEA “International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources”(1994)

Fija el nivel de acción para el radón en viviendas entre 200-600 Bq/m³ de concentración media anual.

2. IAEA “Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards” (2011)

Respecto al radón en interiores expone que los gobiernos proporcionarán información sobre los niveles de radón asociados a los riesgos en la salud, y en su caso de deberán establecer y ejecutar un plan de acción para el control de la exposición.

Se establece un nivel de referencia de < 300Bq/m³(dosis efectiva anual 10mSv) de concentración media anual siempre que las circunstancias sociales y económicas lo permitan.

1.2.1 RECOMENDACIONES DE LA OMS

1.OMS “Air Quality Guidelines for Europe”(1987). Da recomendaciones sobre exposición al radón en interior de viviendas. Se deben de considerar medidas de remedio simples cuando se excedan los 100 Bq/m³ de concentración media anual y emprender acciones de remedio cuando se superen los 400Bq/m³

2. OMS “Manual de la OMS sobre el radón en interiores”(2009)

Recomienda establecer un nivel de referencia nacional de 100Bq/m³ , si dicho nivel no pudiera aplicarse debido a las circunstancias concretas de un país, el nivel de referencia deberá ser < 300Bq/m³ (dosis efectiva anual 10mSv)

En definitiva a día de hoy en España no existe legislación sobre el radón en viviendas, se está esperando la trasposición obligatoria de las recomendaciones EURATOM 2013/59 teniendo como fecha límite febrero de 2018.

En todo caso y siguiendo las recomendaciones internacionales emitidas en los últimos años:

Se seguirá la doctrina ALARA (tan bajo como sea razonablemente posible) para establecer el nivel de referencia nacional sobre un rango de 300 Bq/m³ para iniciar las medidas correctoras en viviendas ya construidas y 100Bq/m³ en viviendas de nueva construcción

Se tomarán los 12 mSv/WLM del Coeficiente de Riesgo de Exposición al Radón para el público en general.

El factor de conversión a dosis será de 12-17 mSv/año para una concentración de 300Bq/m³

Será necesario realizar Planes de Acción Nacional sobre el radón, delimitar zonas propensas al radón (Radón Prone Areas) y realizar campañas de divulgación a la ciudadanía de la problemática de la exposición al radón y sus riesgos para la salud.

ANEXO TABLAS



DESCRIPCIÓN DE 40 LITOESTRATIGRAFÍAS CON POTENCIAL PRESENCIA DE RADÓN

Litoestratigrafías	Sup. (Km ²)	Sup %	Nº Med.	Dens Mues	M.A	D.s MA
Areniscas, arenas, calizas arenosas, margas, arcillas y margocalizas	1388	1.1	13	0.9	50	32.52
Areniscas, lutitas y margas	1846	1.5	22	1.2	201	603.65
Areniscas,microconglomerados y pizarras, con niveles carbonatados. Grupo Cándana y Areniscas de Herrería	2403	1.9	45	1.9	109	108.45
Calizas arrecifales, con rudistas, calizas bioclásticas, dolomías y margas	1770	1.4	95	5.4	80	81.74
Calizas y lutitas, rojas. Caliza Griotte, Calizas de Alba, Vegamián, Baleas y Barcaliente	1429	1.1	8	0.6	64	28.15
Calizas, areniscas y lutitas	1123	0.9	5	0.4	118	143.96
Calizas, calcoesquistos y pizarras	205	0.2	5	2.4	34	43.94
Calizas, dolomías y lutitas. FormaciónRañeces, Abadía y La Vid	625	0.5	9	1.4	64	39.87
Calizas. Calizas de Picos, Escalada, etc.	508	0.4	14	2.8	92	114.00
Conglomerados, areniscas, lutitas y carbón	1186	0.9	17	1.4	52	36.39
Cuarcitas,areniscas, pizarras, calizas. Formación Areniscas de Calymene y Cantera, Pizarras de Guindo y Chavera,Bloques Mixtos, Caliza Urbana	2313	1.8	38	1.6	77	66.92
Cuarcitas (Cuarcita Armoricana, Formación Alto Rey, Culebra y Peñagorda) y alternancia de cuarcitas-areniscas-pizarras (Formación Pochico)	5827	4.7	23	0.4	85	73.43
Cuarcitas y pizarras	2348	1.9	25	1.1	83	72.91
Cuarcitas, pizarras, areniscas, lutitas, conglomerados, calizas y dolomías.Paleozoico Sierra de la Demanda	1217	1.0	6	0.5	96	63.77
Cuarcitas, pizarras y rocas volcanoclásticas y volcanosedimentarias. Cuarcita de Barrios y Fm. Oville	1223	1.0	4	0.3	37	30.28
Cuarcitas, pizarras, areniscas, lutitas, calizas y dolomías. Paleozoico Ibérica Aragonesa	1506	1.2	7	0.5	41	36.76
Esquistos, paragneis, metar., nivel carbonatos/calcosilicatos. Esquistos de Villalcampo,Serie del Duero,Metasedimentos del Sist.Central	1415	1.1	90	6.4	131	152.01
Esquistos,paragneis,cuarcitas,metav.ácidas,micaesquistos Esquistos de Ordenes, Cabo Ortegá, Malpica-Tuy y Lalín-Forcarey	2640	2.1	279	10.6	135	187.80
Esquistos,esquistos grafit.,filitas,cuarcitas, ampelitas y liditas. Grupos Nogueira, Paraño y Fm. Rábano	3138	2.5	185	5.9	151	142.48

Filitas, cuarcitas, micasquistos y yesos	3238	2.6	18	0.6	43	48.17
Filitas, esquistos, cuarcitas, calizas, pizarras y corneanas (Rocas metamórficas)	657	0.5	17	2.6	88	101.00
Grauvacas y pizarras. Facies Culm.	886	0.7	9	1.0	104	122.49
Lutitas con intercalaciones de yesos y carbonatos	594	0.5	22	3.7	58	67.88
Margas, calizas, arcillas y dolomías	2133	1.7	51	2.4	69	102.24
Metasedimentos, gneises blastomiloníticos, anfibolitas y eclogitas. Unidad Central Z.Ossa-Mor.	519	0.4	13	2.5	37	14.44
Micasquistos, cuarcitas y gneises	3522	2.8	30	0.9	119	169.37
Pizarras ampelíticas, a veces con liditas (y areniscas: Fm. Cañamares y Alcolea)	924	0.7	3	0.3	89	7.51
Pizarras oscuras con intercambio de areniscas, cuarcitas y silisbasálticos. Pizarras de Río, Pizarras de Calymene, Formación de Rodada 2	3592	2.9	29	0.8	67	67.17
Pizarras y areniscas. Pizarras de Huergas	331	0.3	3	0.9	142	120.03
Pizarras, areniscas y cuarcitas. Serie de los Cabos	3951	3.2	52	1.3	121	105.19
Pizarras, areniscas y microconglomerados. Pizarras de Lancea	1115	0.9	14	1.3	79	50.30
Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, calizas y rocas volcánicas. Flysch de Terena	2455	2.0	11	0.4	57	67.33
Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, lentejones de carbonatos	1852	1.5	18	1.0	76	112.33
Pizarras, esquistos, metareniscas y gneises anfibólicos. Serie de Villalba	913	0.7	74	8.1	122	179.62
Pizarras, grauvacas y areniscas, a veces con calizas y rocas volcánicas. Facies Culm	5226	4.2	27	0.5	73	75.52
Pizarras, grauvacas y esporádicos niveles carbonatados. Complejo Esquisto-grauváquico	15136	12.1	298	2.0	162	896.84
Pizarras. Pizarras de Luarca y Sueve	2431	1.9	39	1.6	107	107.29
Rocas ácidas metamorizadas (ortogneises, migmatitas). Gneis.gland., metarriolitas (Olo Sapo).Gneis de Pera	7189	5.7	293	4.1	143	171.72
Rocas plutónicas ácidas, hercínicas (granitos, granodioritas, cuarzdioritas)	32933	26.3	1872	5.7	162	336.47
Rocas plutónicas básicas, hercínicas (gabros, dioritas, tonalitas, rocas ultramáficas)	1520	1.2	46	3.0	91	66.65

Tabla 40 litoestratigrafías con potencial presencia

DESCRIPCIÓN DE 107 LITOESTRATIGRAFÍAS VINCULADAS CON EL RADÓN

Litoestratigrafías	Sup (km2)	%	Nº Med	Dens .Mue s.	M.A	D.S
Anfibolitas, metagabros, eclogitas, granulitas máficas, metaperidotitas, serpentinitas y esquistos verdes.	885	0.5	53	6.0	90	94.63
Arcillas (Rellenos de depresiones kársticas)	48	0.0	21	43.8	213	346.35
Arcillas rojas, con intercalaciones de areniscas, margas, calizas y costras (F. Tordómar)	1230	0.7	19	1.5	95	57.56
Arcillas y limolitas. Facies Weald	164	0.1		0.0		
Arcillas y limos	197	0.1	2	1.0	37	27.58
Arcillas, margas y calizas	19	0.0		0.0		
Arcosas y limos arcillosos blancos gris-verdes u ocre, con costras (Pedraja Port., Vill. Adaja, Pte. Runel...)	4192	2.5	77	1.8	96	323.18
Arcosas, conglomerados y arcillas (Ar. de Cabrerizos y Villamayor), Lutitas y areniscas rojas (Facies Aldearrubia)	245	0.1	6	2.4	183	139.32
Arenas y arcillas	34	0.0		0.0		
Arenas y conglomerados	36	0.0	6	16.7	111	57.60
Arenas, arcillas y conglomerados	473	0.3	15	3.2	53	27.98
Arenas, limos arenosos y arcillas amarillentas	1790	1.1	16	0.9	58	52.22
Areniscas, limos y conglomerados ocre (Areniscas de Toro-Corrales, Limos de Geroma, Conglomerados Villa Iazán, G. Sup-...)	2961	1.8	43	1.5	541	1383.6
Areniscas cuarcitas, gravas silíc., conglomerados, arcillas rosadas, calizas, limolitas, y a veces yesos (Garumn)	156	0.1	3	1.9	62	31.56
Areniscas y microconglomerados silíc., con rubefacc. (Series Siderolíticas, Areniscas de Salamanca, Unidad de Torneros)	353	0.2	13	3.7	48	33.18
Areniscas arcóscas, esquistos, lutitas, conglomerados y rocas volcánicas Series Detríticas Inferior y Superior.	5942	3.6	119	2.0	260	726.28
Areniscas ferruginosas, pizarras ampelíticas y areniscas. Areniscas de S. Pedro y Furada. Formación de Formigoso	369	0.2		0.0		
Areniscas y pizarras. Formación de Losadillo	135	0.1	3	2.2	126	178.68
Areniscas, conglomerados y calizas	107	0.1		0.0		
Areniscas, limolitas, pizarras, cuarcitas, conglomerados, vulc. yesquistos bandeados. Alternancia Inferior	106	0.1		0.0		

ANEXO 2: TABLAS

Areniscas, lutitas y margas	1846	1.1	22	1.2	201	603.65
Areniscas, pizarras y calizas. Capas de Saceda. Fm. Almendra	89	0.1	1	1.1	39	0.00
Areniscas, pizarras y conglomerados. Fm. Ermita, Fueyo y Nocedo	261	0.2	2	0.8	54	31.82
Areniscas, pizarras y cuarcitas. Formación Agüeira	704	0.4	8	1.1	103	104.15
Areniscas, microconglomerados y pizarras, con carbonatados. Grupo Cándana y Aren. Herrería	2403	1.4	45	1.9	109	108.45
Bloques, cantos, arcillas (Depósitos glaciares, canchales, coluviones de montaña)	568	0.3	23	4.0	84	101.68
Bloques, cantos, limos y arcillas (Depósitos de ladera, coluviones, morrenas)	768	0.5	4	0.5	63	41.19
Brechas, conglomerados, lutitas, (cantos plut.o paleozoicos)(F.Olalla, Calzadilla, Peñalba, Escalonilla, Mingorría, etc.)	1748	1.1	16	0.9	101	68.42
Brechas y olistostroma	30	0.0		0.0		
Calizas (Calizas "terminales de Tierra de Campos", al este de Burgos)	597	0.4	4	0.7	136	101.78
Calizas arrecifales, con rudistas, calizas bioclásticas, dolomías y margas	1770	1.1	95	5.4	80	81.74
Calizas y dolomías (Calizas "intra-Cuestas", Calizas de Arévalo)	97	0.1	1	1.0	28	0.00
Calizas y dolomías. Calizas de Vegadeo y Láncara	265	0.2	7	2.6	112	66.37
Calizas y lutitas, rojas. Caliza Griotte, Calizas de Alba, Vegamián, Baleas y Barcaliente	1429	0.9	8	0.6	64	28.15
Calizas y margas (Calizas del Páramo 1 o inferior)	2538	1.5	7	0.3	78	28.92
Calizas y margocalizas (Calizas "terminales" de Dueñas)	203	0.1		0.0		
Calizas, calizas margosas y margas. Facies Weald	568	0.3	1	0.2	152	0.00
Calizas, calizas oolíticas, margas, brechas y dolomías	69	0.0		0.0		
Calizas, dolomías y margas. Facies Purbeck	753	0.5	6	0.8	128	155.66
Calizas, margas, cuarcitas y pizarras	25	0.0		0.0		
Calizas, pelitas y areniscas	1340	0.8	7	0.5	122	165.21
Calizas. Calizas de Aquiana	38	0.0		0.0		
Calizas. Calizas de Portilla y de Candás	118	0.1	1	0.8	15	0.00
Calizas. Calizas de Valdeteja	73	0.0		0.0		

ANEXO 2: TABLAS

Coladas lávicas de basaltos, nefelinitas, etc. (Campos de Calatrava)	106	0.1		0.0		
Conglomerados calcáreos y arcillas rojizas (F. Alar del Rey, Compl. Cuevas, Facies Covarrubias)	711	0.4	4	0.6	57	37.69
Conglomerados y areniscas	188	0.1	1	0.5	113	0.00
Conglomerados, arenas y arcillas	309	0.2	50	16.2	171	121.12
Conglomerados, arenas y limos con sílice	54	0.0		0.0		
Conglomerados, areniscas, limolitas y calizas oolíticas. Facies Purbeck	102	0.1		0.0		
Conglomerados, areniscas, lutitas rojas, carbón y rocas volcánicas básicas. Cuenca de Viar	145	0.1		0.0		
Conglomerados, areniscas, lutitas y a veces margas	923	0.6	21	2.3	75	59.07
Conglomerados, areniscas, lutitas y carbón	1186	0.7	17	1.4	53	35.69
Conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas. Costras a techo	597	0.4	12	2.0	100	87.79
Conglomerados, pizarras y grauvacas. Formación San Clodio	139	0.1	3	2.2	228	121.50
Cuarcitas (Cuarcita Armoricana, F.Alto Rey, F.Culebra y Peñagorda) y altas cuarcitas-areniscas-pizarras (Fm.Pochico)	5827	3.5	23	0.4	85	73.43
Cuarcitas feldespáticas. Cuarcitas de Dradelo	13	0.0		0.0		
Cuarcitas y pizarras	2348	1.4	25	1.1	83	72.74
Cuarcitas, conglomerados, areniscas y lutitas. Serie Púrpura y Formación Constante o Bornova	3065	1.8	18	0.6	90	110.95
Cuarcitas, pizarras, areniscas, lutitas, conglomerados, calizas y dolomías.Paleozoico Sierra de la Demanda	1217	0.7	6	0.5	96	63.77
Cuarcitas, pizarras y areniscas	35	0.0		0.0		
Cuarcitas, pizarras y calizas	429	0.3	4	0.9	28	17.17
Cuarcitas, pizarras y rocas volcanoclásticas y volcanosedimentarias. Cuarcita de Barrios y Formación Oville	1223	0.7	4	0.3	37	30.28
Cuarcitas. Cuarcita de Vega	21	0.0		0.0		
Esquistos, paragneis, metar., niveles carbonatos/calcosilicatos. Esquistos Villalcampo, Serie del Duero, Metasedimentos Sist. Central	1415	0.9	90	6.4	131	152.01
Esquistos, paragneis, cuarcitas, metav. ácidas, micaesquistos Esquistos Ordenes, Cabo Ortegá, Malpica-Tuy y Lalín-Forcarey	2640	1.6	279	10.6	135	187.77
Esquistos, paragneises, cuarcitas feldespáticas y mármoles	147	0.1	5	3.4	189	134.23
Esquistos, esquistos grafit., filitas, cuarcitas, ampelíticas y liditas. Grupos Nogueira, Paraño y Formación Rábano	3138	1.9	185	5.9	151	142.48

ANEXO 2: TABLAS

Filitas, esquistos, cuarcitas, calizas, pizarras y corneanas (Rocas metamórficas)	657	0.4	17	2.6	88	101.00
Filonos de cuarzo	106	0.1	15	14.2	86	68.94
Grauvacas y pizarras. Facies Culm.	886	0.5	8	0.9	104	122.49
Gravas cuarcíticas, arenas silíceas y arcillas (Depósitos de rañas y otros aluviales finieógenos)	1538	0.9	10	0.7	63	47.04
Gravas silíceas, conglomerados cuarcíticos y arenas (Ab.Cantoral, Guardo, Cegoñal, Vidanes)	1482	0.9	3	0.2	53	50.09
Gravas, arenas, limos, arcillas, limolitas, calizas (Cuaternario indiferenciado)	5420	3.3	139	2.6	107	253.97
Limos y arenas ocreas, con niveles conglomerados y costras (F.Tierra de Campos, Serna, Villalp.-Sahagún)	6837	4.1	65	1.0	81	63.81
Lutitasarcósicas rojizas, con cantos cuarcíticos y arenas (Facies Peromingo)	456	0.3	9	2.0	70	40.47
Lutitas rojas con niveles conglomerados, areniscas y costras calcáreas(F.Sta María Campo y U.Detr.Aranda)	3196	1.9	36	1.1	88	57.30
Lutitas rojas y conglomerados. Lutitas y arenas ocreas, a veces	186	0.1	3	1.6	40	8.39
Lutitas rojas, areniscas, conglomerados, margas, dolomías y yesos	236	0.1	7	3.0	113	86.57
Lutitas y margas	544	0.3	24	4.4	96	94.56
Lutitas, areniscas, conglomerados y, a veces, calizas arenosas	4536	2.7	86	1.9	61	49.49
Lutitas, margas blancas y niveles carbonatados	210	0.1	6	2.9	65	42.43
Margas y arcillas blancas. Margas de Sanzoles	232	0.1	5	2.2	75	26.32
Margas yesíferas y yesos (Facies Villatoro)	89	0.1	22	24.7	73	94.31
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Cuestas)	1236	0.7	13	1.1	100	103.76
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Dueñas)	1286	0.8	17	1.3	78	43.54
Mármoles, calizas y rocas de silicatos cálcicos	11	0.0		0.0		
Pizarras, cuarcitas y areniscas (Capas de los Montes).Esquistos, pizarras y cuarcitas (F.Puebla, Cerezal, Sta.Eufemia)	1789	1.1	17	1.0	199	173.81
Pizarras	326	0.2	3	0.9	50	39.68
Pizarras y areniscas. Formaciones Villaflor y Campillo	385	0.2	8	2.1	115	123.36
Pizarras y cuarcitas. Formación Casayo	100	0.1		0.0		
Pizarras y niveles de cuarcitas y vulcanitas (Capas de San Pablo)	15	0.0		0.0		

Pizarras, ampelitas e intercambios de cuarcitas, calizas y metavulcanitas. Capas de Garganta, Formación Manzanal	1109	0.7	12	1.1	116	99.69
Pizarras, areniscas y cuarcitas. Serie de los Cabos	3951	2.4	52	1.3	121	105.19
Pizarras, areniscas y microconglomerados. Pizarras de Lancea	1115	0.7	14	1.3	79	50.30
Pizarras, areniscas, cuarcitas, calizas y margas	223	0.1		0.0		
Pizarras, esquistos, metareniscas y gneises anfibólicos. Serie de Villalba	913	0.6	74	8.1	122	179.62
Pizarras, grauvacas y esporádicos niveles carbonatados. Complejo Esquisto-grauváquico	1513 6	9.1	298	2.0	162	896.84
Pizarras, lutitas, areniscas, carbón y calizas. Grupos Sama, Lena, etc.	3149	1.9	59	1.9	93	111.24
Pizarras. Formación Rozadais	350	0.2	2	0.6	38	3.54
Pizarras. Pizarras de Luarca y Sueve	2431	1.5	39	1.6	107	107.29
Rocas ácidas metamorizadas (ortogneises, migmatitas). Gneisgland., metarriolitas (OloSapo). Gneis pera	7189	4.3	293	4.1	143	171.72
Rocas filonianas básicas e intermedias, hercínicas o tardihercínicas (diabasas, lamprófidos)	239	0.1	18	7.5	84	56.65
Rocas piroclásticas (Campos de Calatrava)	67	0.0		0.0		
Rocas plutónicas ácidas, hercínicas (granitos, granodioritas, cuarzdioritas)	3293 3	19.9	1872	5.7	162	336.45
Rocas plutónicas básicas, hercínicas (gabros, dioritas, tonalitas, rocas ultramáficas)	1520	0.9	46	3.0	91	66.65
Rocas volcánicas	85	0.1		0.0		

Tabla 107 litoestratigrafías vinculadas al ²²²Rn

DESCRIPCIÓN DE 63 LITOESTRATIGRAFÍAS RELACIONADA CON EL RADÓN Y SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN

COINCIDENCIA EN AMBOS MÉTODOS		
LITOESTRATIGRAFÍA	M.A (Bq/m3)	D.S
Rocas ácidas metamorizadas (ortogneises, migmatitas). Gn.gland., metarriolitas (Olo Sapo). Gn.pera	143	171.72
Rocas plutónicas ácidas, hercínicas (granitos, granodioritas, cuarzodioritas)	162	336.45
Rocas plutónicas básicas, hercínicas (gabros, dioritas, tonalitas, rocas ultramáficas)	91	66.65
Pizarras, grauvacas y esporádicos niveles carbonatados. Complejo Esquisto-grauváquico	162	896.84
Cuarcitas (C.Armoricana, F.Alto Rey, F.Culebra y Peñagorda) y alt.ctas-aren.-piz.(Fm.Pochico)	85	73.43
Esq., paragn., metar., niv.carb./calcosilic.Esq.Villalcampo,Serie del Duero,Metased.Sist.Central	131	152.01
Esquistos,esq.grafit.,filitas,cuarc.,ampel.y liditas. Grupos Nogueira, Paraño y Fm. Rábano	151	142.48
Esq.,paragn.,cuarc.,metav.ácid.,micaesq. Esq.Ordenes,C.Ortegal,Malpica-Tuy y Lalín-Forcarey	135	187.77
Pizarras, esquistos, metareniscas y gneises anfibólicos. Serie de Villalba	122	179.62
Areniscas,microconglom. y pizarras, con niv. carbonatados. Grupo Cándana y Aren. Herrería	109	108.45
Calizas y dolomías. Calizas de Vegadeo y Láncara	112	66.37
Pizarras, areniscas y cuarcitas. Serie de los Cabos	121	105.19
Pizarras. Pizarras de Luarca y Sueve	107	107.29
Pizarras, areniscas y microconglomerados. Pizarras de Lancea	79	50.3
Cuarcitas, pizarras y rocas volcanocl. y volcanosed. Cuarcita de Barrios y Fm. Oville	37	30.28
Calizas y lutitas, rojas. Caliza Griotte, Calizas de Alba, Vegamián, Baleas y Barcaliente	64	28.15
Conglomerados, areniscas, lutitas y carbón	53	35.69
Cuarcitas, pizarr., areniscas, lutitas, conglom., caliz. y dolom.Paleozoico Sierra de la Demanda	96	63.77
Cuarcitas y pizarras	83	72.74
Grauvacas y pizarras. Facies Culm.	104	122.49
Filitas, esquistos, cuarcitas, calizas, pizarras y corneanas (Rocas metamórficas)	88	101
Areniscas, lutitas y margas	201	603.65
SOLO IDENTIFICADAS POR ZONAS CON POTENCIAL PRESENCIA DE RADÓN		

Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, lentejones de carbonatos	76	112.33
Pizarras, grauvacas y areniscas, a veces con calizas y rocas volcánicas. Facies Culm	73	75.52
Pizarras ampelíticas, a veces con liditas (y areniscas: Fm. Cañamares y Alcolea)	89	7.51
Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, calizas y rocas volcánicas. Flysch de Terena	57	67.33
Metasedimentos, gneises blastomiloníticos, anfibolitas y eclogitas. Unidad Central Z.Ossa-Mor.	37	14.44
Pizarras oscuras con interc.de aren., cuarc.y sils basált. Piz.Río, Piz.Calymene,Fm.Rodada 2	67	67.17
Ctas.,arenis.,piz., caliz.Fm.Ar.Calymene y Cantera,Piz.Guindo y Chavera,B.Mixtos,Cz.Urbana	77	66.92
Calizas, dolomías y lutitas. Fm. Rañeces, Abadía y La Vid	64	39.87
Pizarras y areniscas. Pizarras de Huergas	142	120.03
Calizas. Calizas de Picos, Escalada, etc.	92	114.00
Cuarcitas, pizarras, areniscas, lutitas, calizas y dolomías. Paleozoico Ibérica Aragonesa	41	36.76
Calizas, areniscas y lutitas	118	143.96
Calizas, calcoesquistos y pizarras	34	43.94
Filitas, cuarcitas, micasquistos y yesos	43	48.17
Micasquistos, cuarcitas y gneises	119	169.37
Areniscas, arenas, calizas arenosas, margas, arcillas y margocalizas	50	32.52
Margas, calizas, arcillas y dolomías	69	102.24
Lutitas con intercalaciones de yesos y carbonatos	58	67.88
SOLO IDENTIFICADAS POR VINCULADAS AL RADÓN CON CONCENTRACIONES > 100 Bq/m³		
Areniscas arcósicas, esquistos, lutitas, conglom. y rocas volc. Series Detríticas Inf. y Sup.	260	726.28
Esquistos, paragneises, cuarcitas feldespáticas y mármoles	189	134.23
Piz., cuarc. y arenis.(Capas de los Montes).Esq., piz. y cuarc. (F.Puebla, Cerezal, Sta.Eufemia	199	173.81
Pizarras y areniscas. Formaciones Villafior y Campillo	115	123.36
Areniscas y pizarras. Fm. Losadillo	126	178.68
Pizarras, ampelitas. e interc. de cuarcit., caliz. y metavulc.Capas de Garganta, Fm. Manzanal	116	99.69
Conglomerados, pizarras y grauvacas. Fm. San Clodio	228	121.5
Areniscas, pizarras y cuarcitas. Fm. Agüeira	103	104.15
Calizas, pelitas y areniscas	122	165.21
Lutitas rojas, areniscas, conglomerados, margas, dolomías y yesos	113	86.57
Calizas, dolomías y margas. Facies Purbeck	128	155.66

Calizas, calizas margosas y margas. Facies Weald	152	0
Arenas y conglomerados	111	57.6
Arcosas, conglom. y arcillas (Ar. de Cabrerizos y Villamayor).Lut.y arenisc.rojas (F.Aldearrubia)	183	139.32
Arenis., lim.y congl.ocres (Ar.Toro-Corrales,Limos de Geroma,Congl.Villalazán,G.Sup-Inf Paleóg.	541	1383.6
Conglomerados y areniscas	113	0
Brech.,conglom.,lut.(cantos plut.o paleoz)(F.Olalla,Calzadilla,Peñalba,Escalonilla,Mingorría,etc.)	101	68.42
Calizas (Calizas "terminales de Tierra de Campos", al este de Burgos)	136	101.78
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Cuestas)	100	103.76
Conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas. Costras a techo	100	87.79
Arcillas (Rellenos de depresiones kársticas)	213	346.35
Conglomerados, arenas y arcillas	171	121.12
Gravas, arenas, limos, arcillas, limolitas, calizas (Cuaternario indiferenciado)	107	253.97

Tabla 63 Litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn **DESCRIPCIÓN DE 9 LITOLOGÍAS VINCULADAS AL RADÓN**

Litologías	Sup (km ²)	Sup. %	Nº Med	Dens. Mues.	M.A	Ds MA
Conglomerate, sandstone and siltstone	453	0.2	1	0.22	77	0.00
Gravel, conglomerate, sand and silt	69442	34.8	1850	2.66	68	96.00
Migmatite, marble and undifferentiated granitoids	2573	1.3	178	6.92	125	106.50
Othergranitoids	21497	10.8	1257	5.85	166	390.79
Quartzite, slate, sandstone and limestone	48857	24.5	767	1.57	148	625.83
Sandstone, slate and limestone	14596	7.3	311	2.13	122	119.70
Serpentinite and peridotite. Basic and ultrabasic rocks	4631	2.3	289	6.24	138	201.75
Slate, graywacke, quartzite and conglomerate	22653	11.4	468	2.07	113	212.86
Two-mica granitoid	14566	7.3	785	5.39	156	166.96

Tabla 9 litologías vinculadas al ^{222}Rn

DESCRIPCIÓN DE 12 EDADES VINCULADAS AL RADÓN

Edades	Sup (Km²)	Sup %	Nº Med	Dens. Mues.	M.A	Ds MA
Cambrian-Ordovician	11694	8.7	305	2.61	119	131.94
Carboniferous	17844	13.3	263	1.47	119	161.40
Carboniferous-Permian	453	0.3	1	0.22	77	0.00
Cretaceous-Paleogene	4534	3.4	62	1.37	382	1172.52
Devonian-Carboniferous-Permian	37360	27.8	2116	5.66	162	322.36
Ediacaran	20018	14.9	416	2.08	114	181.23
Ediacaran-Cambrian	7745	5.8	164	2.12	311	1328.08
Ordovician	23997	17.9	290	1.21	87	102.86
Permian-Triassic	964	0.7	39	4.05	80	84.26
Silurian	2576	1.9	23	0.89	96	82.65
Silurian-Devonian	7013	5.2	249	3.55	135	131.66

Tabla 12 edades vinculadas al ²²²Rn**DESCRIPCIÓN DE 38 UNIDADES VINCULADAS AL RADÓN**

Unidades	Sup Km2	Sup %	Dens Mues	Nº Dato s	M.A	Ds M.A
Ultrabasic rocks (serpentine). Active margin	48	0.0	2.1	1	115	0.0
Biotitegranitoids	7438	5.9	5.3	395	189	651.9
Two-mica granitoids	2278	1.8	3.6	83	156	308.4
Biotitegranitoids	6939	5.5	7.2	501	166	185.8
Intermediate and basic igneous rocks	214	0.2	2.3	5	161	162.4
Undifferentiated acid-basic igneous complexes	949	0.8	0.8	8	143	118.0
Basic and ultrabasic rocks	148	0.1	2.7	4	74	55.2
Felsicgneiss and metabasite	887	0.7	3.9	35	84	58.5
Serpentine, metabasite and acid metavolcanics	1766	1.4	9.7	172	144	228.8

Serpentine, metabasite and acid metavolcanics (Northern Metasediments)	1269	1.0	7.4	94	142	163.5
Slate, graywacke, conglomerate or porphyritic rocks	17920	14.2	2.0	356	122	193.6
Gneiss, migmatite, quartzite and marble	241	0.2	0.4	1	164	0.0
Peraluminous granitoids (collisional type)	3333	2.6	4.0	134	144	146.5
Limestone and dolostone	3251	2.6	2.2	73	79	74.9
Sandstone, slate, quartzite, limestone and conglomerate	7618	6.1	1.7	127	95	91.3
Schist and paragneiss	2701	2.1	2.4	66	142	131.2
Metavolcanics	83	0.1	2.4	2	32	8.5
Alcaline granitoids (extensional type)	946	0.8	11.1	105	139	167.8
Conglomerate, sandstone, quartzite and slate	4334	3.4	1.1	47	53	53.7
Quartzite, sandstone and slate	6836	5.4	0.6	41	99	88.2
Slate, sandstone, quartzite and limestone or volcanoclastic rock	10092	8.0	0.7	67	111	143.9
Shale and sandstone	1671	1.3	1.3	21	136	136.6
Bituminous slate, quartzite, lidite and volcanoclastic rocks	2563	2.0	0.9	23	96	82.6
Slate, schist, sandstone, limestone, bituminous shale and lidite	7013	5.6	3.6	249	135	131.7
Migmatitic-anatectic complexes	2573	2.0	6.9	178	125	106.5
Slate, sandstone, conglomerate, coal and limestone	4118	3.3	2.6	107	71	80.2
Conglomerate, sandstone, silt and coal	1303	1.0	1.4	18	98	73.2
Siltstone, sandstone, conglomerate and volcanics or limestone	453	0.4	0.2	1	77	0.0
Conglomerate, sandstone, clay, limestone, dolostone and gypsum	964	0.8	4.0	39	80	84.3
Two-mica granitoids	9797	7.8	4.6	455	170	187.8
Conglomerate, sandstone, sand and marl	7720	6.1	2.5	196	121	311.1
Biotite granitoids	3075	2.4	7.3	223	153	124.7
Conglomerate, sandstone, limestone, marl, clay, gypsum and/or sodium-potassium salts	2679	2.1	0.6	16	553	1226.6
Two-mica granitoids	2243	1.8	3.7	83	152	154.2
Alkalibasalt	433	0.3	2.3	10	75	66.7

Tabla 38 unidades vinculadas al ^{222}Rn

TABLA RESUMEN CORRELACIÓN CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn Y GEOLOGÍAS

VARIABLE	R
Litoestratigrafías 1:200.000 Potenciales al ^{222}Rn (40)	0.29
Litoestratigrafías 1:200.000 Vinculadas al ^{222}Rn (107)	0.41
Litoestratigrafías 1:200.000 Relacionadas al ^{222}Rn (63)	0.34
Litologías 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (9)	0.24
Edades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (12)	0.34
Unidades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (38)	0.36

Tabla Correlación concentración de ^{222}Rn geologías vinculadas al ^{222}Rn **TABLA RESUMEN PROBABILIDAD MEDIA DE PRESENCIA DE GEOLOGIAS SEGÚN RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn**

Probabilidad media (%)	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Presencia 40 Litoestratigrafías Potenciales al ^{222}Rn	0.17	0.42	0.56
Presencia 107 Litoestratigrafías vinculadas al ^{222}Rn	0.21	0.59	0.71
Presencia 63 Litoestratigrafías relacionadas con el ^{222}Rn	0.20	0.47	0.59
Presencia 9 Litologías vinculadas al ^{222}Rn	0.30	0.51	0.62
Presencia 12 Edades vinculadas al ^{222}Rn	0.17	0.46	0.67
Presencia 38 Unidades vinculadas al ^{222}Rn	0.23	0.55	0.64

Tabla Probabilidad media de presencia de geologías según rangos de concentración de ^{222}Rn **TABLA RESUMEN CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn Y GEOLOGIAS**

Nº medidas	< 100 Bq/m ³	100-300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
Concentración de ^{222}Rn 40 litoestratigrafías potenciales al ^{222}Rn	2193 (57%)	1277 (33%)	358 (9%)
Concentración de ^{222}Rn 107 litoestratigrafías vinculadas al ^{222}Rn	2729 (57%)	1550 (33%)	414 (9%)
Concentración de ^{222}Rn 63 litoestratigrafías relacionadas con ^{222}Rn	2413 (57%)	1422(33%)	412 (10%)
Concentración de ^{222}Rn 9 litologías vinculadas al ^{222}Rn	3825 (65%)	1655 (28%)	426 (7%)
Concentración de ^{222}Rn 12 edades vinculadas al ^{222}Rn	2435 (57%)	1438 (34%)	415 (10%)
Concentración de ^{222}Rn 38 unidades vinculadas al ^{222}Rn	2217 (56%)	1342 (35%)	377 (10%)

Tabla Concentración de ^{222}Rn en geologías vinculadas al ^{222}Rn

TABLA RESUMEN CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES Y CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn

VARIABLE	ECUACIÓN	R
Tasa radiación gamma	$y = -22,301 + 11,359x$	0.43
Concentración ^{226}Ra	$y = -9,1649 + 1,955x$	0.40
Presencia yacimientos	$y = 71,874 + 326,11x$	0.15
Presencia fallas	$y = 69,745 + 39,265x$	0.08
Presencia arcillas	$y = 89,055 - 37,412x$	0.17
Presencia cuaternario	$y = 85,072 - 27,611x$	0.09
Presencia karst	$y = 87,946 - 53,723x$	0.21
Permeabilidad global	$y = 104,98 - 11,651x$	0.12
Permeabilidad Muy Baja	$y = 78,315 - 42,391x$	0.09
Permeabilidad Baja	$y = 56,237 + 47,619x$	0.18
Permeabilidad Media	$y = 78,265 - 19,717x$	0.06
Permeabilidad Alta	$y = 87,27 - 82,039x$	0.20
Permeabilidad Muy Alta	$y = 77,265 - 36,719x$	0.06
Rocas volcánicas	$y = 74,754 - 53,297x$	0.04
Rocas Ígnas	$y = 65,546 + 131,22x$	0.31
Rocas Meta detríticas	$y = 66,122 + 43,453x$	0.16
Rocas Evaporíticas	$y = 75,364 - 71,393x$	0.07
Rocas Carbonatadas	$y = 83,242 - 48,838x$	0.16
Rocas Detríticas	$y = 87,884 - 50,189x$	0.17
Rocas Detríticas del Cuaternario	$y = 83,65 - 60,77x$	0.14
Litoestratigrafías 1:200.000 Potenciales al ^{222}Rn (40)	$y = 57,956 + 73,249x$	0.29
Litoestratigrafías 1:200.000 Vinculadas al ^{222}Rn (107)	$y = 48,062 + 89,735x$	0.41
Litologías 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (9)	$y = 54,059 + 57,948x$	0.24
Edades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (12)	$y = 56,68 + 74,359x$	0.34
Unidades 1:1.000.000 Vinculadas al ^{222}Rn (38)	$y = 50,785 + 79,668x$	0.36

Tabla Correlación entre variables y concentración de radón

TABLA RESUMEN PROBABILIDAD MEDIA SEGÚN RANGOS DE CONCENTRACIÓN DE ^{222}Rn

Probabilidad media (%)	< 100 Bq/m³	100-300 Bq/m³	>300 Bq/m³
Presencia de Yacimientos de Uranio	0.04	1.70	3.10
Presencia de Fallas	0.10	0.14	0.16
Presencia de Materiales Arcillosos	0.43	0.26	0.16
Presencia de Materiales Cuaternarios	0.40	0.37	0.26
Presencia de Materiales Kársticos	0.29	0.13	0.00
Presencia Rocas Igneas	0.03	0.19	0.34
Presencia Rocas Meta Detríticas	0.16	0.28	0.27
Presencia Rocas Carbonatadas	0.21	0.11	0.03
Presencia Rocas Detríticas	0.30	0.17	0.11
Presencia Rocas Detríticas del Cuaternario	0.17	0.11	0.06
Presencia Rocas Volcánicas	0.01	0.00	0.00
Presencia Rocas Evaporíticas	0.02	0.01	0.00
Presencia Permeabilidad Muy Alta	0.09	0.07	0.03
Presencia Permeabilidad Alta	0.18	0.08	0.04
Presencia Permeabilidad Media	0.22	0.17	0.12
Presencia Permeabilidad Baja	0.34	0.50	0.60
Presencia Permeabilidad Muy Baja	0.11	0.07	0.02
Presencia 40 Litoestratigrafías Potenciales al ^{222}Rn	0.17	0.42	0.56
Presencia 107 Litoestratigrafías vinculadas al ^{222}Rn	0.21	0.59	0.71
Presencia 9 Litologías vinculadas al ^{222}Rn	0.30	0.51	0.62
Presencia 12 Edades vinculadas al ^{222}Rn	0.17	0.46	0.67
Presencia 38 Unidades vinculadas al ^{222}Rn	0.23	0.55	0.64

Tabla probabilidad media de las variables según rangos de concentración de radón

ANEXO MAPAS

