

Identificación de fuentes de agregados para **Pavimentos**

María Fernanda García Aladín
Luis Mario Ordóñez Silva
José Luis Llano Muñoz
Erlo Gerardo Travi Penna



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Identificación de fuentes de agregados para pavimentos

María Fernanda García Aladín
Luis Mario Ordóñez Silva
José Luis Llano Muñoz
Erlo Gerardo Travi Penna



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Identificación de fuentes de agregados para pavimentos / María Fernanda García Aladín [y otros 3]. -- Santiago de Cali : Pontificia Universidad Javeriana, Sello Editorial Javeriano, 2019.

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-5119-03-1

1. Agregados (Materiales de construcción) 2. Pavimentos flexibles 3. Pavimentos de asfalto 4. Pavimentos rígidos I. García Aladín, María Fernanda II. Ordóñez Silva, Luis Mario III. Llano Muñoz, José Luis IV. Travi Penna, Erlo Gerardo V. Pontificia Universidad Javeriana (Cali). Facultad de Ingeniería y Ciencias. Departamento de Ingeniería civil e industrial.

SCDD 625.85 ed. 23

CO-CaPUJ
Imc/2019



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Identificación de fuentes de agregados para pavimentos

ISBN: 978-958-5119-03-1

ISBN (e): 978-958-5119-04-8

Autores:

- © María Fernanda García Aladín
- © Luis Mario Ordóñez Silva
- © José Luis Llano Muñoz
- © Erlo Gerardo Travi Penna

Formato: 21 cms x 28 cms

© Derechos reservados

© Sello Editorial Javeriano

Coordinación editorial: Claudia Lorena González

Asistente editorial: Manuela Triviño Monar

Portada: Luisa Fernanda Panteves Ospina

Corrección de estilo: Luisa Fernanda Panteves Ospina

Pontificia Universidad Javeriana

Calle 18 N°118-250, Av. Cañasgordas, Santiago de Cali, Valle del Cauca

Teléfonos (57-2) 3218200

Santiago de Cali, Colombia, 2019

El contenido de esta publicación es responsabilidad absoluta de su autor y no compromete el pensamiento de la Institución. Este libro no podrá ser reproducido por ningún medio impreso o de reproducción sin permiso escrito de los titulares del *copyright*.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
2. AGREGADOS NATURALES
 - 2.1 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS SÓLIDOS
 - 2.2 MINERALOGÍA DE LAS ROCAS
 - 2.2.1 Silicatos
 - 2.2.2 Óxidos
 - 2.2.3 Sulfuro
 - 2.2.4 Cloruro
 - 2.2.5 Sulfatos
 - 2.2.6 Fosfatos
 - 2.2.7 Carbonatos
 - 2.3 TIPOS DE ROCAS
 - 2.3.1 Rocas ígneas
 - 2.3.2 Rocas metamórficas
 - 2.3.3 Rocas sedimentarias
 - 2.4 TIPOS DE FALLAS EN PAVIMENTOS REFERIDAS A LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS
 - 2.4.1 Forma de las partículas
 - 2.4.2 Textura de la superficie
 - 2.4.3 Absorción
 - 2.4.4 Peso específico
 - 2.4.5 Morfología

- 2.4.6 Granulometría
- 2.4.7 Composición
- 2.4.8 Solubilidad
- 2.4.9 Carga de superficie
- 2.4.10 Propiedades mecánicas
- 2.5 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RELACIONADAS CON EL COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS GRANULARES
- 2.6 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RELACIONADAS CON EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO RÍGIDO
- 2.7 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RELACIONADAS CON EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO
- 2.8 NECESIDAD DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO
 - 2.8.1 En la durabilidad
 - 2.8.2 En la dureza
 - 2.8.3 En la forma de las partículas
 - 2.8.4 En la colocación y compactación en campo
- 2.9 ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA DIFERENTES USOS
- 3. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE FUENTES DE SUELOS Y AGREGADOS EN PROYECTOS VIALES
 - 3.1 POSIBLES FUENTES DE MATERIALES
 - 3.2 SITUACIÓN PRELIMINAR
 - 3.3 IDEAS Y ACCIONES PARA EL PROYECTO
 - 3.4 PROPUESTA PARA EL PROYECTO VIAL
 - 3.5 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA
 - 3.5.1 Unidad tipo A - primer componente - fuentes existentes y nuevas (Figura 12)

- 3.5.2 Unidad tipo A - segundo componente - fuentes existentes y nuevas (Figura 40)
- 3.5.3 Unidad tipo A - tercer componente - fuentes existentes y nuevas (Figura 12)
- 3.5.4 Unidad tipo A - cuarto componente - fuentes existentes y nuevas (Figura 12)
- 3.5.5 Unidad tipo B - primer componente - reciclaje de materiales provenientes de la vía existente (Figura 12)
- 3.5.6 Unidad tipo B - segundo componente - cobertura del volumen generado (Figura 40)
- 4. EJEMPLO DE APLICACIÓN: ACEPTACIÓN O RECHAZO DE UNA BASE GRANULAR PARA TRÁNSITO NT1
 - 4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INVIAS E-213, 2020) Y DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ NO 200 (INVIAS E-214, 2020)
 - 4.1.1 Cantidad de material que pasa el tamiz No. 200
 - 4.1.2 Análisis granulométrico
 - 4.2 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS (INVIAS E-230, 2020)
 - 4.3 PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO (INVIAS E-227, 2020)
 - 4.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (INVIAS E-125, 2020)
 - 4.5 LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (INVIAS E-126, 2020)
 - 4.6 EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS (INVIAS E-133, 2020)
 - 4.7 VALOR AZUL DE METILENO (INVIAS E-235, 2020)

- 4.8 DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS (INVIAS E-211, 2020)
- 4.9 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5 MM (1½") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INVIAS E-218, 2020)
- 4.10 SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO (INVIAS E-220, 2020)
- 4.11 RELACIONES DE HUMEDAD - MASA UNITARIA SECA DE LOS SUELOS (PROCTOR MODIFICADO) (INVIAS E-142, 2020)
- 4.12 RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (INVIAS E-148, 2020)
- 4.13 RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN PARA TOMA DE DECISIONES
- 5. FORMATOS DE ENSAYO
 - 5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (INVIAS E-213, 2020) Y DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD QUE PASA EL TAMIZ NO 200 (INVIAS E-214, 2020)
 - 5.2 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS (INVIAS E-230, 2020)
 - 5.3 PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO (INVIAS E-227, 2020)
 - 5.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (INVIAS E-125, 2020), LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (INVIAS E-126, 2020)

- 5.5 EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS (INVIAS E-133, 2020)
- 5.6 DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS (INVIAS E-211, 2020)
- 5.7a RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5 MM (1 ½") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INVIAS E-218, 2020)
- 5.7b DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN UTILIZANDO EL APARATO MICRO DEVAL (INVIAS E-248, 2020)
- 5.8 SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO (INVIAS E-220, 2020)
- 5.9 RELACIÓN DE HUMEDAD-MASA UNITARIA SECA DE LOS SUELOS (PROCTOR MODIFICADO) (INVIAS E-142, 2020)
- 5.10 RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (INVIAS E-148, 2020)
- 6. BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** Clasificación de las rocas ígneas
- Tabla 2.** Clasificación de las rocas metamórficas
- Tabla 3.** Condiciones para la formación de diferentes arcillas versus los minerales constituyentes de las rocas magmáticas
- Tabla 4.** Producto de la meteorización versus los minerales constituyentes de las rocas magmáticas
- Tabla 5.** Minerales y sus procesos de meteorización
- Tabla 6.** Propiedades de los agregados relacionadas con el comportamiento del pavimento
- Tabla 7.** Ensayos de laboratorio que miden de forma indirecta las características intrínsecas o extrínsecas de los agregados
- Tabla 8.** Ensayos de laboratorio que miden de forma indirecta las características extrínsecas de los agregados
- Tabla 9.** Ensayos de laboratorio que miden de forma indirecta las características intrínsecas de los agregados
- Tabla 10.** Escala de dureza de Mohs

- Tabla 11.** Potencial de expansión por reacción álcali-sílice para concreto
- Tabla 12.** Especificaciones de los agregados para subbase (SBG), base (BG), mezcla densa en caliente (MDC) y concreto para pavimentos en Colombia
- Tabla 13.** Franjas granulométricas del material de subbase granular en Colombia
- Tabla 14.** Franjas granulométricas del material de base granular en Colombia
- Tabla 15.** Franjas granulométricas de mezcla densa en caliente en Colombia
- Tabla 16.** Franjas granulométricas de agregados para concreto en Colombia
- Tabla 17.** Verificación periódica de la calidad de los materiales granulares para diferentes usos en Colombia
- Tabla 18.** Requerimientos de materiales para carretera
- Tabla 19.** Forma 1 - primera base de datos para el SIG
- Tabla 20.** Forma 2A - registro de muestreo
- Tabla 21.** Forma 2B - tipo de análisis
- Tabla 22.** Granulometría del material de base granular en estudio
- Tabla 23.** Partículas planas del material de base granular en estudio
- Tabla 24.** Partículas largas del material de base granular en estudio
- Tabla 25.** Masa por fracción, requerida para determinar las caras fracturadas
- Tabla 26.** Masa por fracción requerida para determinar las caras fracturadas

- Tabla 27.** Datos para determinar el equivalente de arena
- Tabla 28.** Porcentaje retenido referido para agregado grueso
- Tabla 29.** Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales de base granular en estudio
- Tabla 30.** Tamaño de muestra y número de esferas
- Tabla 31.** Tamaño de muestra y número de esferas
- Tabla 32.** Porcentaje retenido referido para agregado grueso
- Tabla 33.** Porcentaje retenido referido para agregado fino
- Tabla 34.** Pérdidas por sanidad para la fracción gruesa
- Tabla 35.** Pérdidas por sanidad para la fracción fina
- Tabla 36.** Resultados del ensayo de Proctor modificado
- Tabla 37.** Datos del Proctor modificado, corregidos al incluir el retenido en la malla 3/4"
- Tabla 38.** Resultados del ensayo de Proctor modificado para 56, 25 y 10 golpes
- Tabla 39.** Resultados de esfuerzo-penetración
- Tabla 40.** Resultados de expansión
- Tabla 41.** Resultados de peso unitario seco versus CBR%
- Tabla 42.** Lista de chequeo para material de base para tránsito NT1

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Estructuras típicas de pavimentos flexible y rígido
- Figura 2.** Sistemas cristalinos
- Figura 3.** El ciclo de las rocas
- Figura 4.** Relación entre la composición química y las rocas ígneas
- Figura 5.** Grado de metamorfismo y facies metamórficas
- Figura 6.** Franjas granulométricas del material de subbase granular
- Figura 7.** Franjas granulométricas del material de base granular de gradación gruesa
- Figura 8.** Franjas granulométricas del material de base granular de gradación fina
- Figura 9.** Franjas granulométricas del material de mezcla densa en caliente
- Figura 10.** Franjas granulométricas de agregado para concreto
- Figura 11.** Diagrama general de utilización de fuentes de materiales en proyectos viales
- Figura 12.** Diagrama metodológico de búsqueda y aprovechamiento de fuentes de materiales
- Figura 13.** Información digital de títulos mineros

- Figura 14.** Material del río Sogamoso
- Figura 15.** SIG de FM y sus coberturas sobre el eje de la vía
- Figura 16.** SIG de FM y su registro fotográfico
- Figura 17.** SIG de FM y granulometría de uno de sus productos
- Figura 18.** SIG de FM y sus coberturas sobre el eje de la vía
- Figura 19.** SIG de FM y materiales para terraplén con CBR mayor a 20 %
- Figura 20.** Distribución por tamaños del material granular
- Figura 21.** Material de base respecto a la especificación BG-40
- Figura 22.** Material de base respecto a la especificación BG-38
- Figura 23.** Tamiz de barras
- Figura 24.** Calibrador de espesores
- Figura 25.** Calibrador de longitudes
- Figura 26.** Ensayo de partículas largas (izquierda) y planas (derecha)
- Figura 27.** Partículas de agregado para determinar las caras fracturadas
- Figura 28.** Cuchara de Casagrande y acanalador
- Figura 29.** Muestra de suelo para determinar límite líquido
- Figura 30.** Curva para determinar el límite líquido
- Figura 31.** Rollos de suelo para determinar el límite plástico
- Figura 32.** Agitación de la muestra de arena y la solución de trabajo
- Figura 33.** Solución de trabajo
- Figura 34.** Lavado de las paredes del tubo
- Figura 35.** Lectura del nivel de arcilla
- Figura 36.** Lectura del nivel de arena

- Preparación de la muestra de ensayo con azul de metileno
- Figura 37.** Preparación de la muestra de ensayo con azul de metileno
- Figura 38.** Preparación de la muestra de ensayo con azul de metileno
- Figura 39.** Prueba de azul de metileno. Para 6 cm³ el resultado negativo porque se reabsorbe después de 2 minutos. Para 7 cm³ el resultado es positivo
- Figura 40.** Máquina de Los Ángeles, esferas de acero y tamiz No. 12
- Figura 41.** Preparación de muestra de gradación A para máquina de Los Ángeles
- Figura 42.** Material resultante después de 500 revoluciones en máquina de Los Ángeles
- Figura 43.** Preparación de muestra para ensayo de sanidad de una base granular
- Figura 44.** Fracción de 19 mm (3/4") a 37.5 mm (1 1/2") sumergida en sulfato de magnesio
- Figura 45.** Fracción de 19 mm (3/4") a 37.5 mm (1 1/2") seca al horno
- Figura 46.** Partícula de agregado desintegrada por la acción de los ciclos de humedecimiento y secado
- Figura 47.** Curva de compactación
- Figura 48.** Curva esfuerzo-penetración
- Figura 49.** Curva peso unitario seco - CBR%

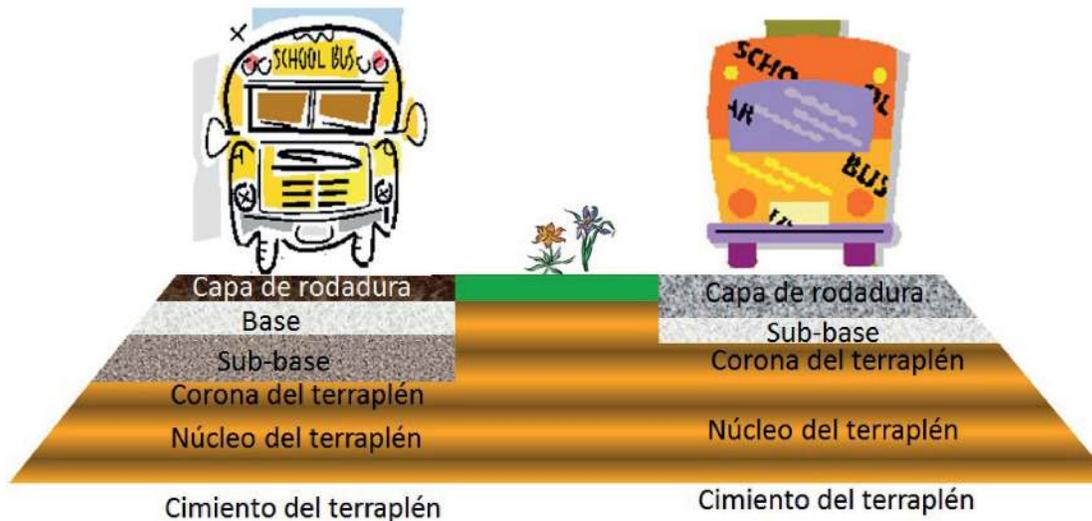
1. INTRODUCCIÓN

Los agregados son materiales que se usan en la construcción, derivados, en su mayor parte, de las rocas naturales; algunos pueden ser sintéticos, como las arcillas expandidas o las escorias de horno. Los agregados sirven para fabricar concretos, realizar mezclas asfálticas y ser utilizados solos. Los pavimentos, por su parte, son estructuras construidas en capas de distintos materiales, superpuestas, que se apoyan sobre la subrasante natural o sobre un terraplén. Los más comunes tienen una o dos capas granulares (subbase y base) y una capa de rodadura, que puede ser mezcla asfáltica, concreto ([Figura 1](#)) o adoquines. Estas capas se diseñan para soportar las deformaciones y esfuerzos impuestos por las cargas del tránsito y el clima. En ellas, los agregados tienen una importante función, dado que ocupan alrededor del 70 % del volumen de concreto, del 90 % de la mezcla asfáltica y el 100 % del volumen de las bases y subbases granulares.

En las estructuras de pavimento, las capas más superficiales soportan la mayor magnitud de esfuerzos y deformaciones y por lo tanto deben ser construidas con materiales de mejor calidad, mientras que las capas más

profundas pueden ser construidas con materiales de menor especificación debido a que dichos esfuerzos y deformaciones se disipan con la profundidad.

Figura 1. Estructuras típicas de pavimentos flexible y rígido



Las especificaciones de calidad exigidas para cada material y capa estructural deben permanecer en el tiempo, pues se garantizan para periodos mucho más largos que la propia vida de diseño, debido a que las vías son parte del patrimonio de una nación, y por consiguiente son heredables a las futuras generaciones. Así, aunque con el paso de los años la economía y el desarrollo inducen al mejoramiento de las especificaciones geométricas de la red vial, es muy probable que los materiales de las capas de pavimentos antiguos permanezcan aún en los proyectos futuros de mantenimiento, mejoramiento y rehabilitación, salvo que la vía sea abandonada o se modifique su diseño

geométrico en planta o perfil; de allí la importancia de la durabilidad de los materiales.

El presente documento se centra en la descripción de los ensayos que se deben hacer a los materiales granulares que conforman las capas de pavimento, para garantizar las características mecánicas y funcionales en el tiempo. Los tipos más habituales de pavimentos son:

- **Pavimento flexible:** en estos la capa de rodadura es de algún tipo de mezcla asfáltica, y lo más común es que bajo ella se encuentre una capa de base y otra de subbase. Toda la estructura está soportada por la subrasante, que puede ser natural o elaborada.
- **Pavimento rígido:** estos se caracterizan porque la capa de rodadura es de concreto y bajo ella típicamente solo hay una capa de subbase. Toda la estructura está soportada por la subrasante, que puede ser natural o elaborada.
- **Pavimento semirrígido:** en estos pavimentos la capa de rodadura es de algún tipo de mezcla asfáltica, pero bajo ella se encuentra una capa de base estabilizada de alta rigidez, y otra de subbase, que puede ser granular. Toda la estructura está soportada por la subrasante, que puede ser natural o elaborada.
- **Pavimento articulado:** en estos la capa de rodadura está conformada por bloques de adoquines pequeños; bajo ella se encuentra una capa de arena y

eventualmente otra de subbase granular. Toda la estructura está soportada por la subrasante, que normalmente es natural.

Los materiales utilizados en las capas de pavimento son agregados, asfaltos, mezclas asfálticas, cal, cementos y concretos, y es importante caracterizarlos a partir de ensayos de laboratorio y valorarlos a partir de las especificaciones de obra, para definir si son aptos para la construcción de la vía. Si un material no cumple con una especificación se debe evaluar si esta **no conformidad**

depende de sus características intrínsecas o extrínsecas.

- **Características intrínsecas:** se refiere a las cualidades que son independientes de la forma y el tamaño del material (Gaskell, 1981). Se dividen en:
 - Propiedades físicas: se definen por la percepción de los sentidos, por ejemplo, color, olor, sabor, sonido, textura.
 - Propiedades químicas: determinadas por el grado de cohesión de las moléculas y el arreglo molecular, por ejemplo, los puntos de ebullición y fusión, solubilidad, densidad, dureza, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, tenacidad, fragilidad, gravedad específica, calor específico.
- **Características extrínsecas:** aluden a las cualidades que dependen de la forma y el tamaño de la muestra

(Gaskell, 1981), es decir, la forma y el tamaño de la probeta de ensayo. Estas propiedades son masa, volumen, peso, inercia, impermeabilidad, porosidad, carga de rotura, entre otras.

En términos generales, si un material **no cumple con una característica intrínseca** debe estudiarse sus propiedades físicas y químicas y determinar si es posible mejorarlo con algún procedimiento para llevarlo a la condición de calidad requerida por la obra, y definir su aceptación o rechazo. Si un material **no cumple con una característica extrínseca** debe verificarse el proceso de producción, transporte y almacenamiento, y solucionarlo. **En resumen, si la no conformidad es de carácter intrínseco se debe revisar la fuente de explotación, mientras que si es extrínseca se debe revisar el proceso de producción.**

2. AGREGADOS NATURALES

En general, los agregados naturales provienen de la explotación, molienda y tamizado de las rocas, las cuales están conformadas por uno o más minerales. Los minerales se han clasificado desde hace mucho tiempo de acuerdo con su composición química y su forma cristalina. Aunque hasta el momento se han descubierto 118 elementos solo unos pocos son los formadores de la corteza terrestre, es decir, de los suelos y las rocas como tal; entre ellos se encuentran el carbono, hierro, aluminio, calcio, azufre, potasio, sílice, oxígeno, entre otros. Por ejemplo, el carbono C, dependiendo de su arreglo cristalino, puede formar el diamante (dureza 10 en la escala de Mohs) con arreglo tridimensional en tetraedros y enlaces covalentes simples tridimensionales, o el grafito (dureza de 1 a 2) con arreglo bidimensional de anillos de seis átomos, con enlaces covalentes simples en el mismo plano, pero con enlaces de Van der Waals entre planos.

2.1 Estructura cristalina de los sólidos

Los sólidos se clasifican en cristalinos y amorfos dependiendo de cómo se ordenan sus moléculas, átomos e

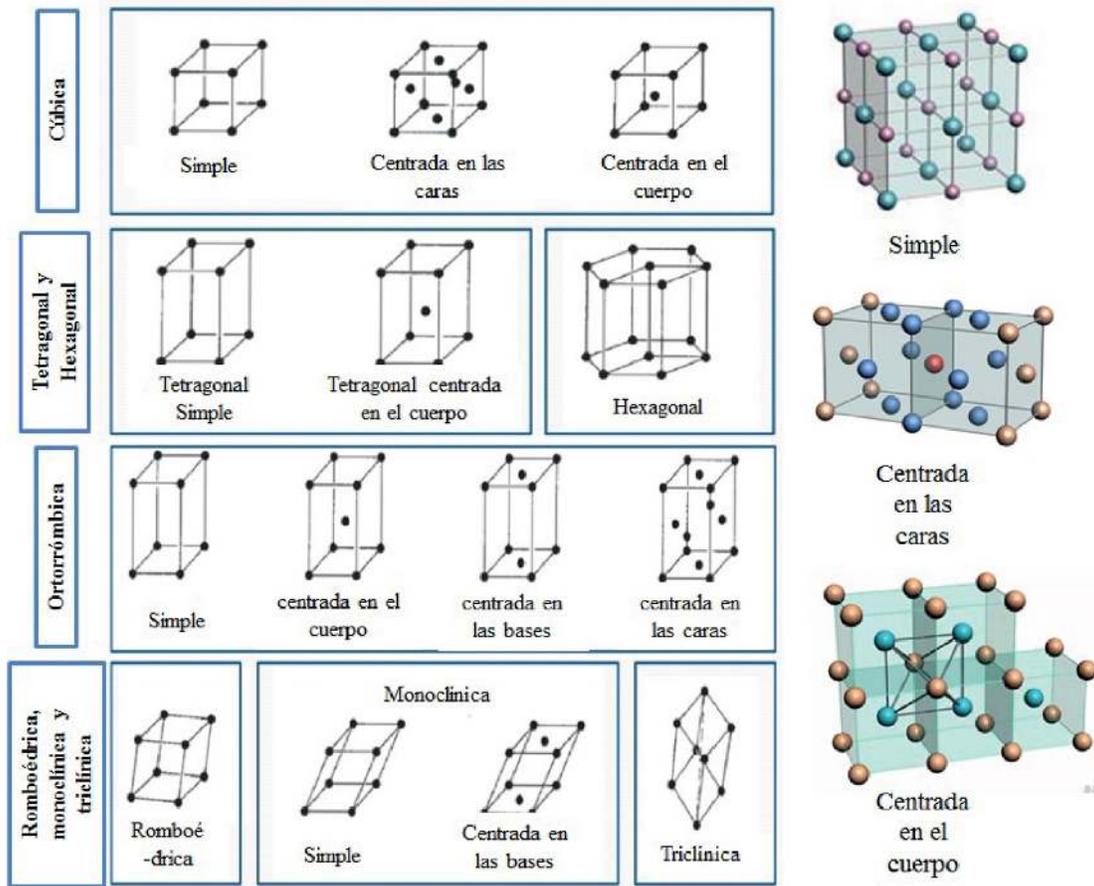
iones. Si el ordenamiento es estricto, regular y se repite periódicamente en tres dimensiones, se habla de un *crystal* y tiene orden de largo alcance ($\sim > 100$ nm); este arreglo es típico de los metales y las aleaciones. Si por el contrario carece de ordenamiento definido a gran escala, se le denomina *amorfo*. Por ejemplo, los gases monoatómicos inertes presentan arreglo sin orden dada la energía cinética y el movimiento desordenado de los átomos, mientras que la madera, el plástico y el vidrio son amorfos, porque presentan un orden de corto alcance en la periodicidad del arreglo de los átomos.

Desde el punto de vista del estado de la materia, los gases son amorfos, pero en el proceso de transformación hacia el estado líquido disminuye la velocidad de desplazamiento de los átomos y tienden a formar arreglos regulares con núcleos de formación de la fase sólida. Ahora bien, si la transformación de líquido a sólido es lenta, los átomos y los iones se pueden ordenar y forman estructuras cristalinas, mientras que, si esa transformación es rápida, puede quedar congelada una estructura desordenada (amorfa), la cual persiste hasta que los átomos tengan la ocasión de agruparse nuevamente en una forma ordenada, con la ayuda de la presión, la temperatura o por medio de esfuerzos violentos, a lo que se le denomina *metamorfismo*.

Por otra parte, los materiales cristalinos pueden ser de dos tipos: monocristales y policristales. Los primeros están formados por un solo tipo de cristal, mientras que los segundos están constituidos por muchos cristales o granos.

Los arreglos cristalinos frecuentemente se representan como una serie de esferas imaginarias (átomos, iones o moléculas), que están separadas espacialmente a una distancia fija, y unidas por una red, que simboliza los enlaces entre ellas, conformando así celdas idénticas en tamaño, forma y orientación ([Figura 2](#)). Las celdas unitarias *simples* tienen sus esferas concentradas en los vértices y, por lo tanto, en un arreglo periódico cada esfera es compartida por ocho celdas unitarias. En las *celdas centradas en el cuerpo* la segunda capa de esferas se acomoda en los huecos de la primera. En las celdas centradas en las bases o en las caras, las esferas que se ubican en las caras son compartidas por dos celdas unitarias.

Figura 2. Sistemas cristalinos



Fuente: adaptado de Lenguado Villamizar (2012) y Universidad de Sevilla (2009).

Los silicatos son los minerales formadores de roca. A continuación, se presenta el listado de algunos de ellos con sus respectivos arreglos cristalinos: