

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA ARTICULACIÓN DE CADERA AFECTADA POR DESCALCIFICACIÓN ÓSEA EMPLEANDO MÉTODOS FRACTALES

Data de aceite: 03/04/2023

Jose Luis Soto Trinidad

Instituto de Investigaciones Aplicadas a la Ingenierías, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana
ORCID: 0000-0001-5343-0985

RESUMEN: Las articulaciones de cadera de los enfermos de osteopenia y osteoporosis muestran un comportamiento mecánico complejo producto de la descalcificación del tejido óseo, que modifica su estructura interna y sus propiedades. Las articulaciones se someten a esfuerzos porque junto con la musculatura que las rodean, soportan el peso del cuerpo en posturas estáticas y dinámicas a fatiga. Bajo condiciones de carga, la falla biomecánica de las articulaciones es el producto de las fuerzas que actúan cuando sobrepasen su capacidad de equilibrio mientras se desgastan. El comportamiento mecánico de las articulaciones es importante porque estas pertenecen al tronco y relacionan el hueso coxal con el fémur izquierdo o derecho durante las actividades de trabajo. Entonces, a través de métodos fractales se evaluaron los resultados de

densitometría ósea. Por Trazas auto-similares en Box-Dimension y en Mass-Dimensión se determinó la dimensión fractal de las articulaciones para evaluar las irregularidades y desgaste de las misma. Asimismo, describe la variación de masa ósea en el tiempo que pasa de la condición normal hasta la osteoporosis.

PALABRAS CLAVE: Dimensión fractal, comportamiento fractal, desgaste, articulaciones de cadera, comportamiento mecánico y tejidos óseos.

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE HIP JOINT AFFECTED BY BONE DECALCIFICATION USING FRACTAL METHODS

ABSTRACT: The hip joints of patients with osteopenia and osteoporosis show a complex mechanical behavior due to the decalcification of the bone tissue, which modifies its internal structure and its properties. The joints are subjected to stress because together with the muscles that surround them, they support the weight of the body in static and dynamic postures to fatigue. Under loading conditions, the biomechanical failure of joints is the product of forces that act when they exceed their

ability to balance while wearing. The mechanical behavior of the joints is important because they belong to the trunk and relate the coxal bone to the left or right femur during work activities. Then, through fractal methods, the results of bone densitometry were evaluated. Through self-similar traces in Box-Dimension and in Mass-Dimension, the fractal dimension of the joints was determined to evaluate their irregularities and wear. Likewise, it describes the variation of bone mass in the time that passes from the normal condition to osteoporosis. **KEYWORDS:** Fractal dimension, fractal behavior, wear, hip joints, mechanical behavior and bone tissues.

1 | INTRODUCCIÓN

En el estudio del comportamiento mecánico de las articulaciones de cadera, es importante tomar en consideración los fundamentos de ciencias relacionadas con la geometría fractal, tales como la mecánica de la fractura y la mecánica de materiales. Por ende, la mecánica de materiales trata del estudio del comportamiento mecánico de los materiales bajo condiciones de carga. La mecánica de la fractura trata del análisis de las grietas u otras imperfecciones (poros, inclusiones, microgrietas), su efecto como elevadores de esfuerzo. Y se conoce como tenacidad a la fractura como la capacidad de carga límite que una estructura puede soportar antes de la falla [1].

Entre los procesos que llevan a las fallas se encuentra la acumulación de fatiga por las cargas a las que se ve expuesta una estructura o el sistema esquelético del cuerpo humano [2], [3]. El daño se ve en ocasiones concentrando en regiones de sistemas en las que existe movimiento relativo entre dos o más elementos formando sistemas tribológicos que de forma natural, trabajan con una alta precisión y eficiencia, dotando al cuerpo humano de una estructura articulada [4], [5], [6]; además, se ven afectadas por enfermedades como la osteoartritis, la osteoporosis y la artritis reumatoide que afectan la forma en que llevan a cabo los fenómenos de fricción y los esfuerzos que provoca en estas zonas; la lubricación y su efecto en la movilidad del sistema en su totalidad; y desgaste, la velocidad con que se produce, la resistencia que ofrecen los componentes al mismo y el daño consecuente que provoca en estos sistemas [6].

En el tejido óseo, el daño por fatiga, en forma de microfisuras, se ha relacionado con fenómenos como la adaptación a entornos de estrés alterados. Esto implica que el daño que se produce durante la carga fisiológica normal es lo suficientemente grave como para causar fallas si no se repara. Por tanto, la contribución de la fatiga a la fractura osteoporótica es compleja [4], [5]. Al estimular la remodelación ósea la fatiga promueve el deterioro visible de la microarquitectura del tejido cortical y trabecular¹ que tiene su efecto muy significativo en las articulaciones de la cadera (Figura 1) [7].

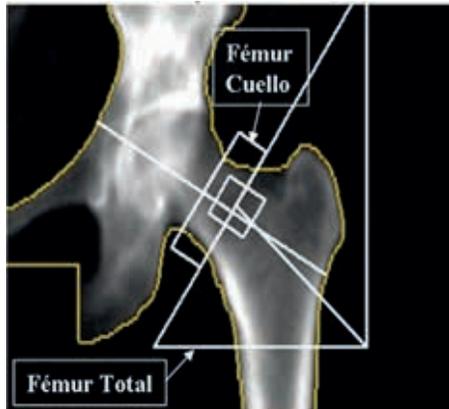


Figura 1. Análisis de masa ósea en el fémur izquierdo. Imagen de absorciometría con rayos X de doble energía en la cadera izquierda.

Fuente: Lorente Ramos y col., 2012.

Datos experimentales apoyan la hipótesis de que un factor importante en el estudio de la relación entre la fractura y la estructura geométrica de la superficie de propagación es la naturaleza fractal de las fracturas, es decir, características de autosimilitud de las superficies de agrietamientos a diferentes escalas de observación [8], análisis que provee los parámetros necesarios para la predicción de una futura propagación y por ende, las vías para evitarla o en su defecto estar preparado desde el momento que una persona comienza a presentar descalcificación de sus tejidos óseos hasta llegar al riesgo de osteoporosis severa [16].

Por lo tanto, el propósito de esta investigación es estudiar y evaluar el comportamiento mecánico de las articulaciones de cadera que presentan condiciones patológicas de descalcificación ósea empleando métodos de la geometría fractal, ya que por los métodos de imágenes médicas actuales son herramientas que permiten obtener resultados cualitativos y cuantitativos de la densidad de los tejidos, pero no son predictivos ni describen o generan la forma compleja del daño para estimar su magnitud. Además, los métodos tradicionales se basan en exponer los pacientes a los efectos radiológicos cada vez que se quiera monitorear la condición patológica y más aún estos métodos no permiten precisar la cantidad de calcio exacta a suplir que pueda fortalecer u homogenizar los tejidos afectados desde el punto de estudio de las matemáticas o desde los fundamentos de la Geometría Euclidiana [9].

Lo complejo radica en que la articulación coxofemoral es un tipo de articulación sinovial esferoide que conecta la cintura pélvica a la extremidad inferior. En esta articulación, la cabeza del fémur se articula con el acetábulo del hueso coxal. Por ende, el comportamiento mecánico de esta articulación es muy complejo porque es una articulación multiaxial que permite un amplio rango de movimientos: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación

externa, rotación interna y circunducción. Igualmente, esta articulación sacrifica movilidad por estabilidad y soporte de peso [5]. [6]. El peso total de la parte superior del cuerpo es transmitido a través de esta articulación a los miembros inferiores durante la bipedestación. Esta articulación es la más estable del cuerpo humano. En consecuencia, con la dimensión fractal de las superficies de desgaste de las articulaciones de cadera se cuantificará el grado de irregularidad y fragmentación de los tejidos óseos, y también describirá la variación de masa ósea a través del tiempo que pasa un paciente de la condición normal diagnosticado con descalcificación hasta adquirir osteopenia u osteoporosis.

2 | MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales se utilizaron en esta investigación son las imágenes y data numérica obtenidas en el estudio por densitometrías ósea en pacientes mujeres en el país. Asimismo, para hacer este estudio, se empleó el sistema GE Lunar Prodigy Advance DXA manufacturado por GE Medical Systems LUNAR [13].

2.2 Metodología para el estudio

2.2.1 Metodología para el análisis de imágenes médicas por densitometría ósea (DXA)

Inicialmente, se definió una población de 40 pacientes mujeres entre 42 y 75 años de edad, afectadas por descalcificación de los huesos. Luego, se llevó a cabo la prueba de densitometría ósea (DXA) en los centros de Diagnósticos y centros médicos en periodo de tiempo comprendido entre agosto 2011 hasta septiembre 2021. La cual consistió en el análisis cuantitativo del tejido óseo de cada paciente en la articulación de cadera, y de ahí obtuvieron el contenido mineral óseo (BMC), la densidad mineral ósea (BMD) y el T-score y el Z-score y la imagen medica de la zona analizada.

El T-score y Z-score ofrecen expresan la severidad de la enfermedad en cada paciente, el T-score es el valor de la desviación estándar de la densidad mineral ósea con respecto a una persona sana de 30 años del mismo sexo, mientras que el Z-score es la desviación estándar de la densidad ósea de una persona con la de una persona promedio de la misma edad y sexo [10], [11], [12].

2.2.2 Metodos de la mecánica fractal para la evaluación de comportamiento mecánico las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

La metodología que se utilizó para evaluar las superficies afectadas de las articulaciones de cadera debido a la erosión por descalcificación ósea consistió en:

Primero, se trataron las imágenes médicas obtenidas por densitometría guardándolas en formatos de imágenes.

Segundo, se evaluaron las imágenes a través del software BENOIT. En un caso, se analizó la superficie visualizada en cada una de las imágenes empleando el método de Trazas auto similares por Box Dimension para obtener el tipo de fractal regido por un modelo de ecuación que describe el daño causado por la enfermedad y una dimensión fractal que cuantifica el grado de irregularidad. En el otro caso, se usó el método de Trazas auto similares por Mass Dimension y de manera similar se determinó el tipo de fractal y la dimensión fractal [9].

Tercero, Se obtuvo la gráfica de la parte afectada, en el caso de ambos métodos.

Cuarto, se interpretó el fractal encontrado y se determinó la dimensión fractal [9], [13], [14]. En el caso del análisis con el método BOX DIMENSION, la dimensión fractal (D_b) está definida como el exponente de la proporcionalidad $N(\epsilon) \propto \frac{1}{\epsilon^{D_b}}$, siendo $N(\epsilon)$ el número de estructuras con auto-similitud de tamaño lineal ϵ requeridas para cubrir la estructura. En este caso considera que el espacio se divide en una cuadrícula de cajas con tamaño ϵ , y el número de cajas que contienen al fractal se determina de la forma $D_b = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}}$

$$D_b = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}} \quad (1)$$

Por otro lado, en el caso del método MASS DIMENSION, se define la dimensión fractal (D_m) a partir de la proporcionalidad $m(r) \propto r^{D_m}$, donde $m(r) = M(r)/M$ es la masa contenido en cierto círculo de radio r , $M(r)$ es el conjunto de puntos contenidos en el círculo y M es el total de punto en el conjunto.

3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis de fractal de las articulaciones coxofemorales de pacientes con descalcificaciones de tejidos óseos

En la tabla 1. se encuentran los resultados del análisis fractal obtenidos por medio del software BENOIT.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD Db	MASS DIMEN	SD Dm
P10EA	0.833	1.869	0.004	2.495	0.161
P24AY	0.964	1.884	0.006	1.949	0.012
P25AMY	1.363	1.839	0.011	2.611	0.208
P27AH	0.901	1.889	0.088	1.898	0.008
P28AO	0.983	1.874	0.005	1.886	0.004
P29AL	0.913	1.875	0.011	1.974	0.049
P32ADR	1.036	1.866	0.005	1.899	0.018
P33AK	1.151	1.857	0.004	2.552	0.331
P38AAJ	1.099	1.848	0.007	2.081	0.143
P39AR	0.902	1.875	0.005	1.874	0.003
P40AS	1.102	1.862	0.005	3.06283	0.844
P41ALS	1.04	1.845	0.009	1.91272	0.011

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD Db,: desviación estándar de Dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD Dm; desviación Dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 1. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de las articulaciones coxofemorales de pacientes con condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó la dimensión fractal de las articulaciones coxofemorales por ambas técnicas; BOX DIMENSION y MASS DIMENSION para todos los pacientes y cuyos valores se encuentran la tabla 1. Estas medidas representan la cuantificación de las asperezas de la superficie en la región global de las articulaciones de caderas de las mujeres que están presentando falta de carcio en sus tejidos óseos. Se observa que el daño acumulativo de las condiciones patológicas se comporta como un fractal.

Del análisis fractal, se deduce que los valores de la dimensión fractal obtenidos por Box dimension son menores con respecto a los obtenidos por MASS dimension. En sentido genérico con la primera técnica, la dimensión fractal es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de los huesos de las pacientes evaluadas mientras que con la segunda técnica se obtuvieron valores de la dimensión de las articulaciones en término de la masa perdida, variable física que caracteriza el desgaste originado por la descalcificación ósea [15], [16]. En consecuencias, las dimensiones fractales determinadas son proporcionales con los valores de densidad de mineral óseo de la región global de las articulaciones para fines de estimación del desgaste causado por la enfermedad [17], [18].

En el caso del análisis fractal del primer paciente P10EA, la Figura 2, muestra la

imagen médica obtenida del análisis de densitometría ósea en la articulación de cadera.

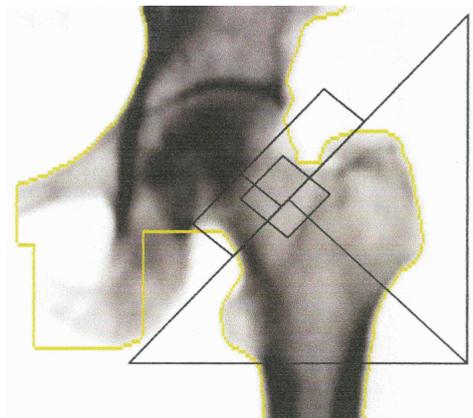


Figura 2. Imágen médica obtenida del análisis DXA de la articulación de cadera del paciente P10EA. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Cortesía GRUMED. RD.

La Figura 3, se observa la imagen procesada por el método box dimension para determinar la dimensión fractal del fractal encontrado.

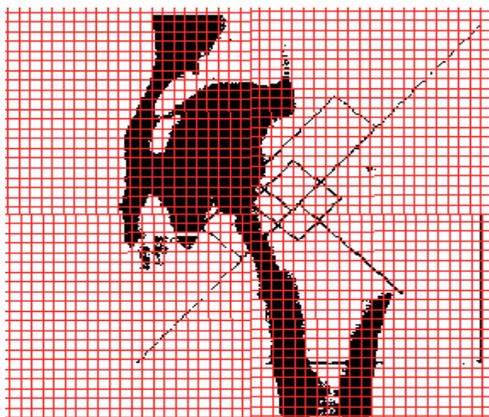


Figura 3. Imágen procesada de la articulación de la paciente P10EA usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático con evolución logarítmica que describe el comportamiento fractal de la zona afectada de la articulación de cadera de la paciente P10EA que se encuentra en estado de condición normal en su padecimiento de descalcificación ósea se muestra en la figura 4.

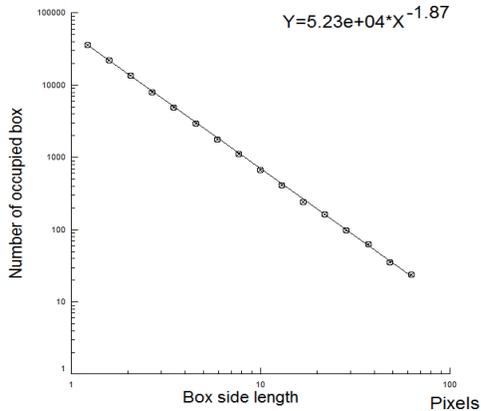


Figura 4. Modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P10EA en condicon normal usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimension.

Fuente: Elaboracion propia

El modelo fractal resultante de la articulacion de cadera de la paciente P10EA y su dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension es el de la ecuación 2.

$$Y = 5.23 \times ex^{-1.8695} \quad (2)$$

El modelo matemático de la ecuación 2, es una ecuación logarítmica que describe el comportamiento mecánico de la articulación de cadera de la paciente P10EA y sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de sus tejidos óseos. Este modelo es un indicador del desgaste. Asimismo, por medio del método MASS Dimision, se obtuvo el modelo fractal de la ecuación 3.

$$Y = 0.262 \times ex^{2.49515} \quad (3)$$

A partir del modelo matemático de la ecuación 3, se puede estudiar la pérdida de masa ósea, la cual tiene una desviación estándar respecto a su dimensión fractal de $Db = 1.8695$ siendo su dimensión fractal $Dm = 2.49515$. Esta ecuación indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial. Este comportamiento mecánico de la descalcificación de los tejidos en la articulación de cadera se muestra en la figura 5.

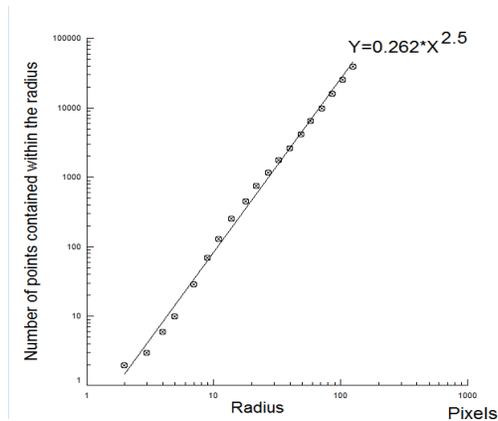


Figura 5. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P10EA en condición normal, usando el método fractal Mass dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

Fuente: Elaboración propia.

La grafica que muestra el comportamiento del modelo fractal obtenido por método Mass dimension se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 6



Figura 6. Imagen procesada de la articulación de la paciente P10EA usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión. Condición normal de descalcificación ósea.

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la dimensión fractal D_b es cercano a la media de 1.8686 ± 0.014258 , con una desviación positiva de 0.000818 obtenidos a través del método Box dimension para la articulación de cadera de la paciente. Sin embargo, el valor de la dimensión fractal de la zona afectada D_m es superior a la media de 2.1227 ± 0.32880 , con una desviación positiva de 0.37242 obtenida con el método Mass dimension para la misma articulación. El valor superior de ambas dimensiones fractal en la zona afectada indica que la paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo relativamente consistente, lo cual se corrobora con el

hecho de que al paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.823 g/cm², superior al valor promedio de 0.7924 g/cm² ± 0.0615 con una desviación positiva 0.0306, es decir, esto explica el comportamiento mecánico de la condición normal del proceso de descalcificación del tejido óseo. igualmente, el estudio fractal se aplicó a todas las pacientes que se enlistadas en la tabla 1.

En la tabla 2. se muestran los resultados del análisis fractal obtenidos en pacientes en condición de osteopenia.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD Db	MASS DIMEN	SD Dm
P23AL	0.912	1.883	0.003	2.458	0.277
P26AC	0.792	1.866	0.007	1.946	0.017
P30AH	0.755	1.862	0.013	1.987	0.049
P31AH	0.687	1.871	0.009	1.933	0.004
P36AJ	0.714	1.881	0.002	2.010	0.267
P37AJ	0.673	1.862	0.008	2.001	0.030

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD Db: desviación estándar de dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD Dm; desviación dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 2. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de articulaciones coxofemorales de pacientes con osteopenia.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que los datos de la tabla 2, se muestra la imagen médica del análisis de densitometría ósea de una paciente, la cual se muestra en la figura 7.

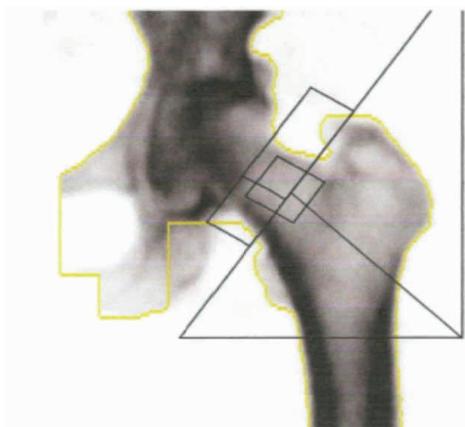


Figura 7. Imágen médica obtenida del análisis DXA del la articulacion de cadera del paciente P23AL con ostopenea.

Fuente: Cortesia GRUMED. RD.

Por otro lado, en la figura 8, se observa la imagen procesada por el método Box Dimension para determinar el fractal durante el análisis fractal de la imagen del paciente P23AL.

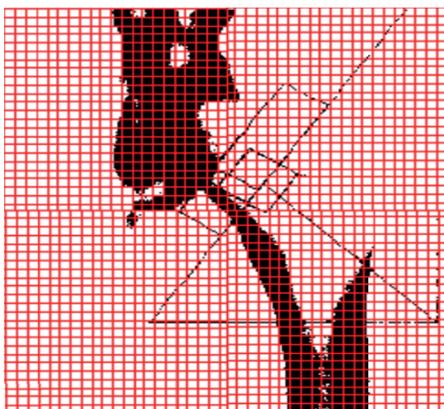


Figura 8. Imágen procesada de la articulación de la paciente P23AL usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimension.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se obtuvo el modelo matemático con evolución logarítmica que representa el comportamiento fractal de los resultados médicos que indican la osteopenia de la paciente P23AL. Para el caso de la dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension este modelo es:

$$Y = 5.58 \times 10E04x^{-1.8830} \quad (4)$$

Le ecuación 4 indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial a medida que ocurre la descalcificación de los tejidos en la articulación de cadera de la paciente P23AL, en condición de osteopenia, y se grafica en la figura 9.

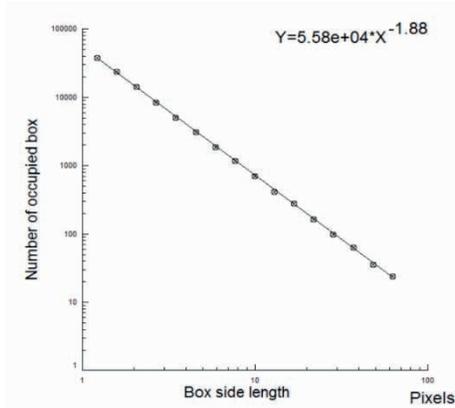


Figura 9. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P23AL con osteopenia usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión.

Para el caso de la dimensión fractal obtenida por el método Mass Dimension a partir de los resultados de densitometría de la articulación de cadera de la paciente P23AL con osteopenia, el modelo matemático es el de la ecuación 5.

$$Y = 0.37 \times 10E04x^{2.4588} \quad (5)$$

Este modelo fractal representa la pérdida de masa ósea tiene una dimensión fractal de $D_m = 2.4588$, se grafica en la figura 10.

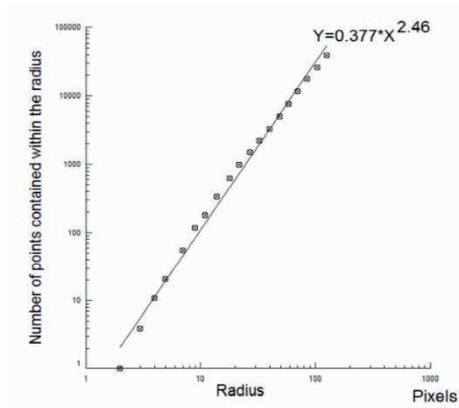


Figura 10. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P23AL usando el método fractal Mass dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

Fuente: Elaboración propia.

La grafica de la figura 10 que muestra el comportamiento del modelo fractal utilizado el método Mass dimension se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 11.

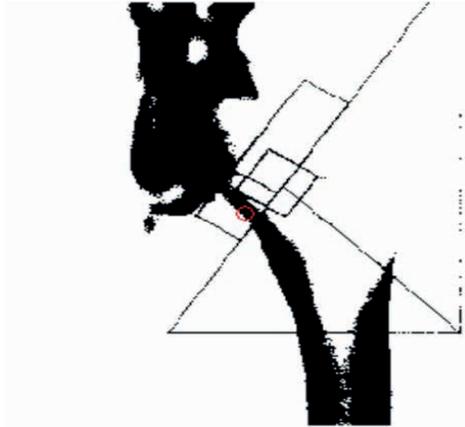


Figura 11. Imagen procesada de la articulación de la paciente P23AL con osteopenia usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión.

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la dimensión fractal D_b es cercano a la media de 1.8686 ± 0.014258 , con una desviación positiva de 0.0143. El valor de la dimensión fractal D_m es superior a la media de 2.1227 ± 0.32880 , con una desviación positiva de 0.3361. El valor superior de ambas dimensiones fractal indica que el paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo consistente, lo cual se correlaciona con el hecho de que el paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.845 g/cm^2 , superior al valor promedio de $0.7924 \text{ g/cm}^2 \pm 0.0615$ para pacientes con osteopenia, como el caso de este, con una desviación positiva 0.0526.

Por otro lado, en la tabla 3. se encuentran los resultados del análisis fractal obtenidos por medio del software BENOIT en las pacientes con osteoporosis.

Paciente	TOBMD	BOX DIMEN	SD D_b	MASS DIMEN	SD D_m
P34AK	0.627	1.893	0.009	1.904	0.002
P35AK	0.64	1.873	0.008	2.049	0.119

TOBMD: Densidad mineral en la región global de la cadera. SD D_b ,: desviación estándar de Dimensión fractal por la técnica Box Dimension y SD D_m ; desviación Dimensión fractal por la técnica Mass Dimension.

Tabla 3. Valores de la dimensión fractal y densidad mineral ósea de la región total (TOBMD) de las articulaciones coxofemorales de pacientes con osteoporosis.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 se muestra la imagen médica obtenida del análisis de densitometría ósea de la paciente con condición de osteoporosis.

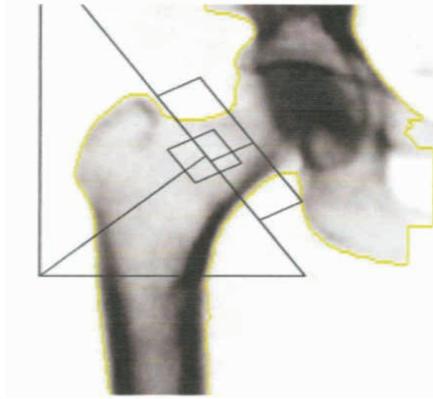


Figura 12. Imagen médica obtenida del análisis DXA de la articulación de cadera del paciente P35AK con osteoporosis.

Fuente: Cortesía GRUMED. RD.

Luego, se procesó la imagen de la figura 12 por el método Box Dimension cuyos resultados se muestran en la figura 13.

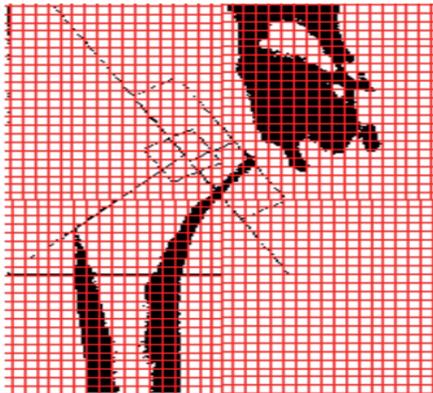


Figura 13. Imagen procesada de la articulación de la paciente P23AL con osteoporosis usando el método box dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión.

Fuente: Elaboración propia.

La dimensión fractal obtenida por el método Box Dimension, cuyo modelo matemático con evolución logarítmica del método de la enfermedad osteoporosis de la paciente P35AK es la ecuación 6.

$$Y = 6.24 \times 10E04x - 1.8725 \quad (6)$$

Esta ecuación indica que la pérdida de masa ósea tiene un comportamiento exponencial a medida que ocurre la descalcificación de los tejidos en la articulación de

cadera tal como se muestra en la figura 12.

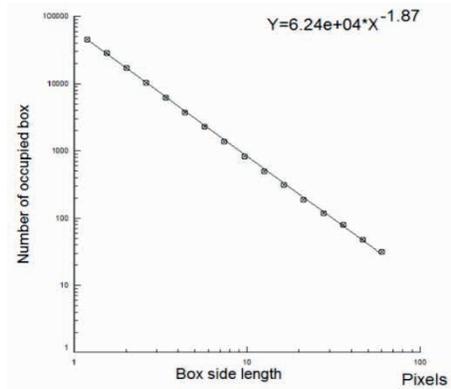


Figura 14. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P35AK osteoporosis, usando el método fractal Box dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión.

Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, para la paciente P35AK con osteoporosis, la dimensión fractal obtenida por el método Mass Dimension y el modelo matemático que representa el comportamiento fractal de la enfermedad es el de la ecuación 7.

$$Y = 2.2 \times 10E04x2.04945 \dots\dots\dots(7)$$

Este modelo fractal que describe el comportamiento de la osteoporosis de la paciente P35AK muestra una evolución logarítmica de enfermedad y se muestra en la figura 15.

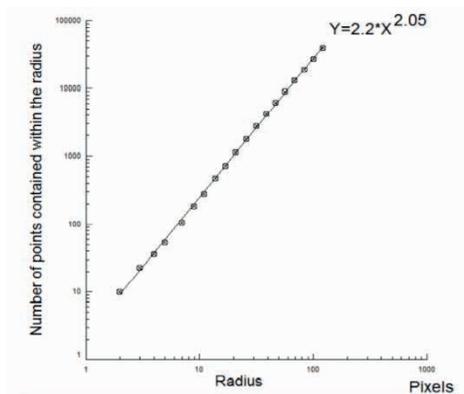


Figura 15. Modelo fractal resultante de la articulación de cadera de la paciente P35AK usando el método fractal Mass Dimension para determinar el tipo de fractal y su dimensión fractal.

La grafica (Figura 15) que muestra el comportamiento del modelo fractal utilizado el método Mass dimension en el análisis de la osteoporosis que presenta la paciente P35AK, se obtuvo durante el procesamiento de la imagen de la figura 16.

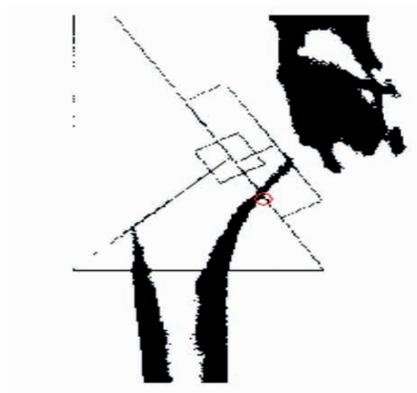


Figura 16. Imagen procesada de la articulación de la paciente P35AK osteoporosis, usando el método Mass dimension para determinar el modelo fractal y su dimensión.

El valor inferior de la dimensión fractal D_m indica que el paciente tiene una microarquitectura del tejido óseo deteriorado, lo cual no se correlaciona con el hecho de que el paciente posee una densidad mineral ósea en la región del cuello del fémur de 0.612 g/cm^2 , inferior al valor promedio de $0.6155 \text{ g/cm}^2 \pm 0.6155$ para pacientes con condición osteoporosis, con una desviación negativa de -0.0035 .

Como se ve en la Tabla 3, para el método BOX DIMENSION, los valores de la dimensión fractal son más bajos para las personas sanas, mientras que para el método MASS DIMENSION, la dimensión fractal aumenta de forma proporcional al valor de la densidad mineral ósea.

Es importante tener imágenes médicas de buena calidad para el estudio; puesto que un menor contenido de calcio da como resultado una menor atenuación de los rayos X en el hueso, por lo que la película fotográfica se vuelve más oscura y se reduce el brillo de la imagen digital [19].

Si toma como referencia el valor de la dimensión fractal de un hueso de una persona sana, en este caso del paciente P40AS ($\text{TOBMD}=1.102 \text{ g/cm}^2$), cuya dimensión $D_b = 1.86195$ es relativamente baja y $D_m = 3.06283$ es muy alta, porque su densidad de microarquitectura es muy alta.

Con los métodos de la geometría fractal de Box Dimension y Mass Dimension se determinó la dimensión fractal que caracteriza la rugosidad que se presenta en las articulaciones de caderas producto de la descalcificación de los tejidos óseos, de manera tal que al comportarse el efecto de pérdida de masa ósea como un fractal este explica las condiciones patológicas de osteopenia y osteoporosis [10], [16], [19].

4 | CONCLUSIONES

La geometría fractal se utilizó como herramienta útil para el análisis de imágenes y resultados de densitometría ósea. Se aplicaron los métodos de Box Dimension y Mass Dimension en la evaluación de las imágenes médicas para determinar la dimensión fractal y el coeficiente fractal. En este trabajo se puede ver que la estimación de la dimensión fractal se puede determinar mediante procedimientos de correlación de imágenes digitales, sobre la base de imágenes de tomografía computarizada y a pequeña escala, de tal manera que, las tomografías de hueso cortical muestran grandes diferencias en la distribución de densidad. Estos cambios pueden ser representados adecuadamente por la dimensión fractal.

El método Mass Dimension muestra una correlación más significativa, con coeficiente de Pearson > 0.50 en casi todos los casos de los valores de masas de los pacientes con respecto al método Box Dimension, el cual también es una buena técnica para el análisis y discusión de resultados. Por lo tanto, la microestructura ósea a diferentes escalas se puede representar mediante un conjunto estadístico auto-similar en tres dimensiones (escala de grises X – Y) que codifica la dimensión fractal. A la sazón, la dimensión fractal representa las propiedades geométricas de este conjunto auto-similar; por tanto, las irregularidades en la distribución de la densidad y las principales características geométricas de la microestructura ósea pueden representarse adecuadamente mediante este parámetro.

Se pueden hacer estimaciones en base a los resultados de los fractales y dimensión fractal obtenidos a partir de los métodos de la geometría fractal empleados en esta investigación; puesto que se evaluó la pérdida de masa ósea y el comportamiento mecánico de las articulaciones coxofemorales de pacientes mujeres afectadas por enfermedades con descalcificación de los huesos, y de aquí, los valores de la dimensión fractal se utilizaron para evaluar el comportamiento mecánico de estas articulaciones de caderas en las condiciones patológicas de normal, osteopenia y osteoporosis. Encontrándose que la descalcificación a través del tiempo tiene un comportamiento fractal, que describe el grado de avance en su secuencia de deterioro.

REFERENCIAS

[1] Newell, James (2011). *Ciencia de materiales: aplicaciones en ingeniería*. Alfaomega.

[2] Athanasiou, K. A. y col. (ago. de 2000). «Fundamentals of biomechanics in tissue engineering of bone». En: *Tissue Engineering* 6.4, págs. 361-381. issn: 1076-3279. doi: 10.1089/107632700418083.

[3] Cereatti, A. y col. (feb. de 2010). «*Is the human acetabulofemoral joint spherical?*» En: *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume* 92-B, págs. 311-314. doi: 10.1302/0301-620x.92b2.22625.

[4] Ammann, P. y R. Rizzoli (mar. de 2003). «*Bone strength and its determinants*». En: *Osteoporosis International* 14, págs. 13-18. doi: 10.1007/s00198-002-1345-4

- [5] González, Luis Alonso, Gloria María Vásquez y José Fernando Molina (mar. de 2009). «Epidemiología de la osteoporosis». En: Revista Colombiana de Reumatología 16, págs. 61-75. doi: 10.1016/s0121-8123(09)70119-7.
- [6] Olorunlambe, K. A., D. E. T. Shepherd y K. D. Dearn (jun. de 2019). «A review of acoustic emission as a biotribological diagnostic tool». En: Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces 13, págs. 161-171. doi: 10.1080/17515831.2019.1622914.
- [7] Marcus, Robert y Sharmilla Majumder (2001). «The nature of osteoporosis». En: OSTEO-POROSIS, SECOND EDITION VOLUME 2, CHAPTER 35, págs. 3-17. doi: 10.1016/b978-012470862-4/50036-2.
- [8] Borodich, Feodor M. (1999). «Fractals and fractal scaling in fracture mechanics». En: International Journal of Fracture 95, págs. 239-259. doi: 10.1023/a:1018660604078.
- [9] Balankin, Alexander S. (mayo de 1997). «Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks». En: Engineering Fracture Mechanics 57, págs. 135-203. doi: 10.1016/s0013-7944(97)00007-6.
- [10] Caeiro Rey, J. R. y col. (ago. de 2005). «Factores determinantes de la resistencia ósea». En: Revista Española de Enfermedades Metabólicas Óseas 14, págs. 67-74. doi: 10.1016/S1132-8460(05)72686-6.
- [11] Edith Miranda, V. y col. (ene. de 2013). «Densitometría ósea». En: Revista Médica Clínica Las Condes 24, págs. 169-173. doi: 10.1016/S0716-8640(13)70142-1.
- [12] Sheu, Angela y Terry Diamond (s.f.). «Diagnostic tests: Bone mineral density: Testing for osteoporosis». En: Australian Prescriber 39 (), págs. 35-39. doi: 10.18773/austprescr.2016.020.
- [13] Mecholsky, J.J., D.P. DeLellis y N.A. Mecholsky (ene. de 2020). «Relationship between fractography, fractal analysis and crack branching». En: Journal of the European Ceramic Society. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.12.061.
- [14] Mecholsky, John J. y Stephen W. Freiman (dic. de 1991). «Relationship between Fractal Geometry and Fractography». En: Journal of the American Ceramic Society 74, págs. 3136-3138. doi: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb04313.x.
- [15] Haba, Yvonne y col. (2012). «Relationship Between Mechanical Properties and Bone Mineral Density of Human Femoral Bone Retrieved from Patients with Osteoarthritis». En: The Open Orthopaedics Journal 6. url: <https://dx.doi.org/10.2174/1567-20174325001206010458>.
- [16] Looker, A. C. y col. (ago. de 1998). «Updated Data on Proximal Femur Bone Mineral Levels of US Adults». En: Osteoporosis International 8, págs. 468-490. doi: 10.1007/s001980050093.
- [17] Osterhoff, Georg y col. (jun. de 2016). «Bone mechanical properties and changes with osteoporosis». En: Injury 47, S11-S20. doi: 10.1016/s0020-1383(16)47003-8.
- [18] Gulsen, Akdogan, Goncu Merve y Parlak Meltem (ene. de 2018). «Biotribology of Cartilage Wear in Knee and Hip Joints Review of Recent Developments». En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, pág. 012040. doi: 10.1088/1757-899x/295/1/012040.

[19] Mendoza, Óscar Javier Espitia, Yuri Hercilia Mejía Melgarejo y Henry Arguello Fuentes (ene. de 2016). «Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual». En: *Tecnura* 20.47, págs. 119-135. issn: 2248-7638. doi: 10 .14483 /udistrital. jour.tecnura.2016.1.a10.