



Estudio de la estructura geométrica de árboles eléctricos

(y de la dinámica de las descargas parciales)

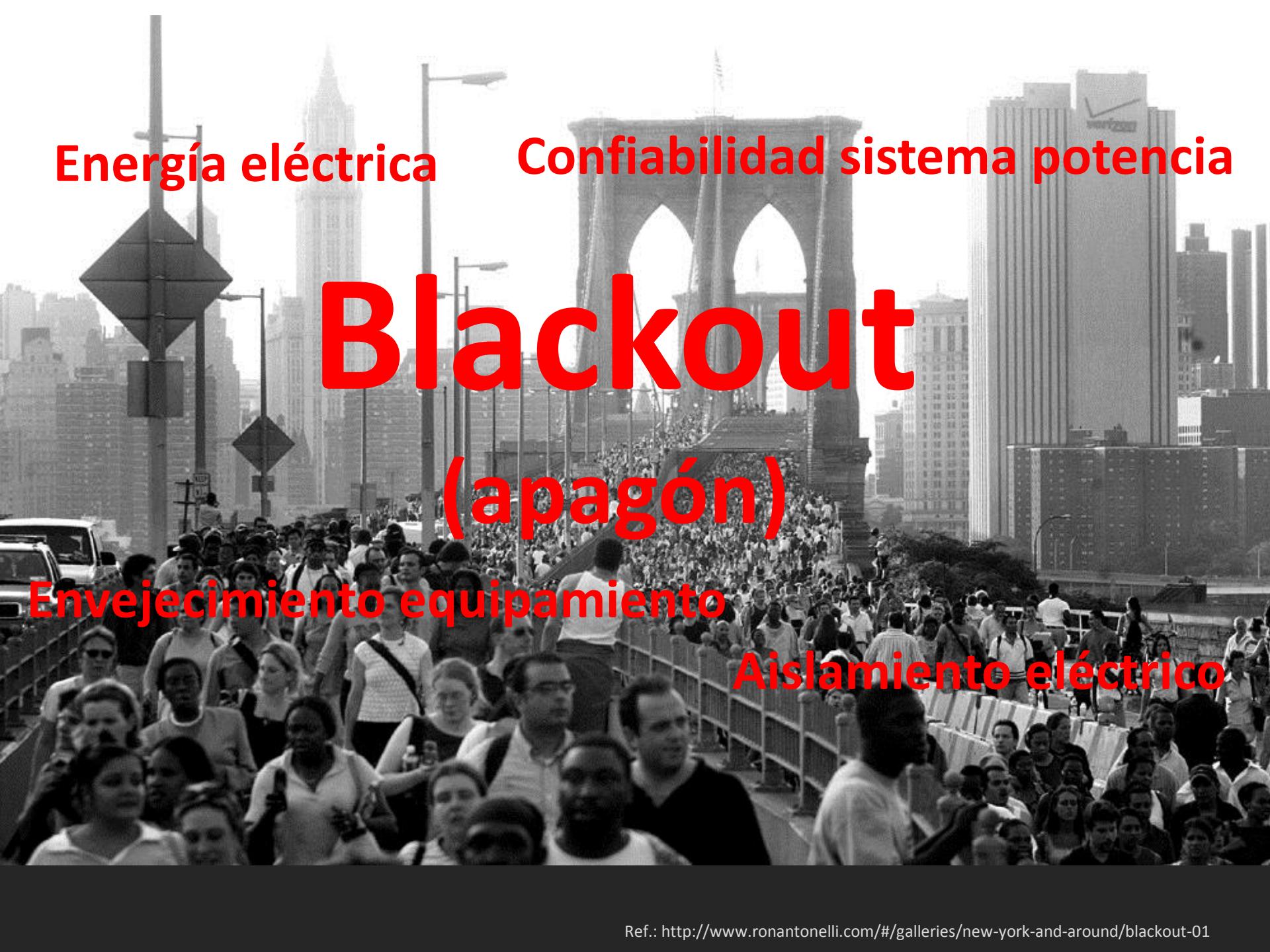
involucradas en la degradación de aislamientos eléctricos

Roger Schürch Brandt

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Presentación (adaptada) para asignatura Laboratorio de Modelación I MAT-282
6 de septiembre de 2016





Energía eléctrica

Confiabilidad sistema potencia

Blackout (apagón)

Envejecimiento equipamiento

Aislamiento eléctrico

Equipamiento de potencia





Área de alta tensión y aislamientos:

Multi-disciplinaria

- Física
- Química
- Ciencia de materiales
- Mecánica – Termodinámica
- **Matemáticas**
- Simulación y cálculo de campo eléctrico
- Tecnología de medición
- Electrónica
- Procesamiento de señales
- etc. etc...

... al servicio de la ingeniería eléctrica

Estructura geométrica de árboles eléctricos

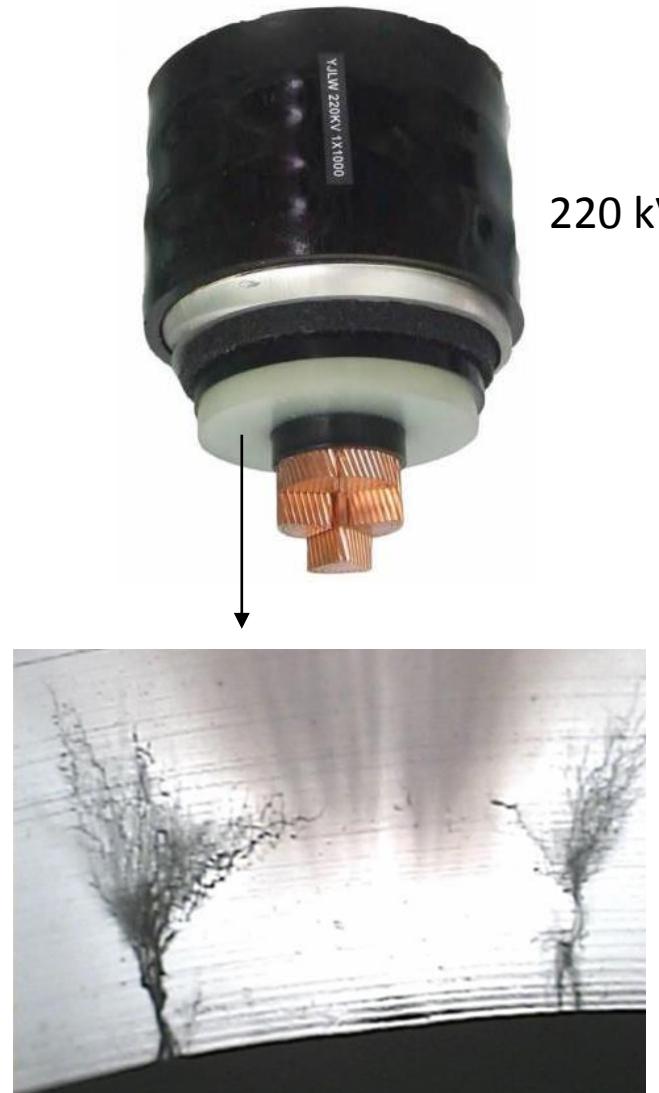
1. Trasfondo
2. Description experimental (ya hecho!)
3. Modelos geométricos 3D (ya hecho!)
4. Temas: Caracterización y dimensión fractal

1. Trasfondo

2. Description experimental (ya hecho!)
3. Modelos geométricos 3D (ya hecho!)
4. Temas: Caracterización y dimensión fractal

Árboles eléctricos

- Canales de degradación en aislamiento polimérico de AT
- Precursor de falla en equipamiento de potencia
- Mecanismo de iniciación y crecimiento no están claros





Crecimiento del árbol y falla

The University
of Manchester

MANCHESTER
1824

Electrical breakdown through an electrical tree

R. Schurch, S. M. Rowland, R. S. Bradley and J. P. Withers
"A Novel Approach for Imaging of Electrical Trees"
IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal - 2012

R. Schurch, S. M. Rowland and J. P. Withers
"Techniques for Electrical Tree Imaging"
IEEE Conference on Imaging Systems and Techniques, Manchester - 2012

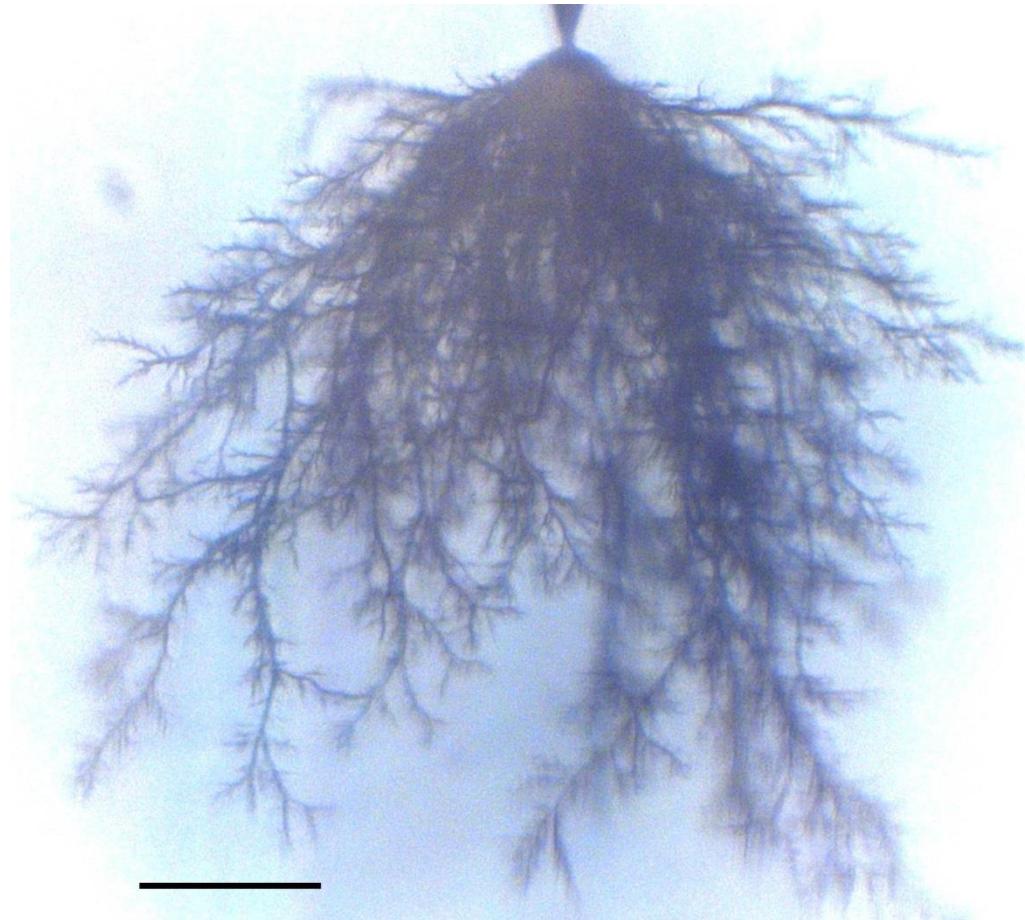
<http://www.youtube.com/user/ElectricalTreesCEIDP/videos>

Tipos de árboles

Branch-type (rama)



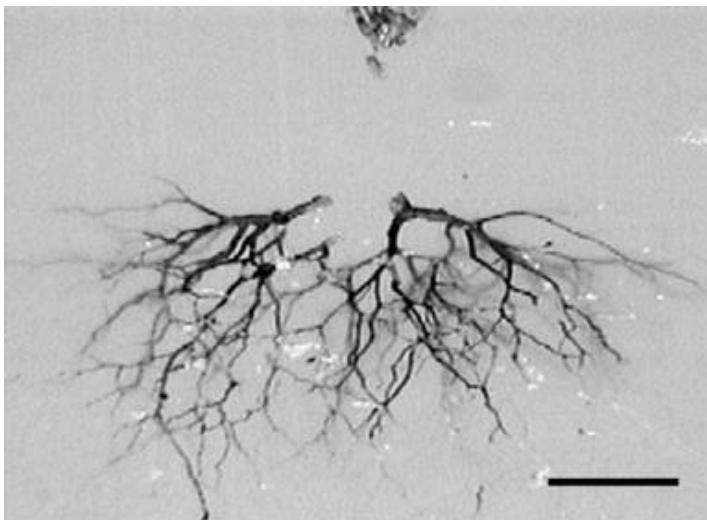
Bush-type (bosque)



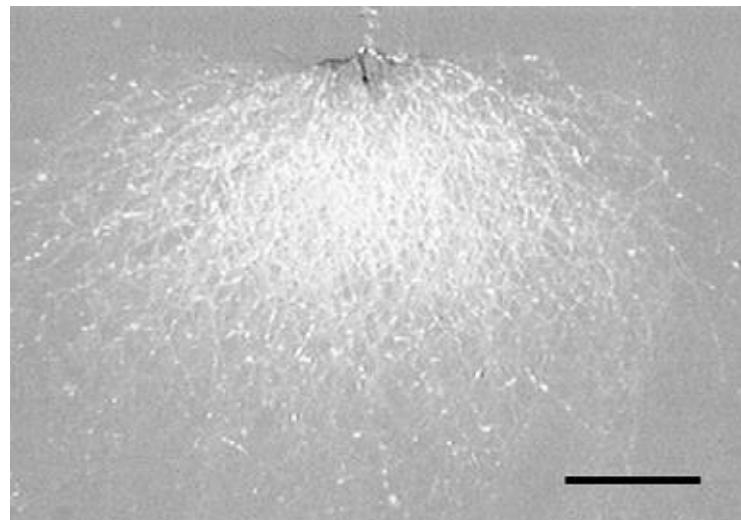
Escalas: 200 μm

Tipos de árboles (2)

Estructura conductora



Estructura no-conductora



Escalas: 200 μm

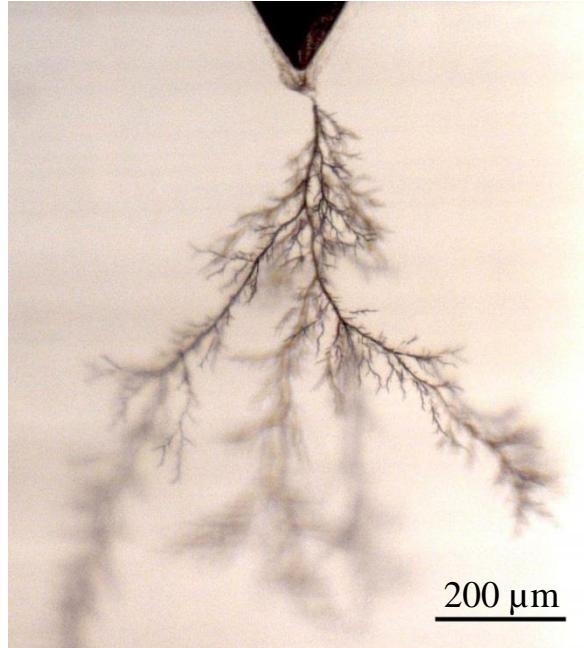
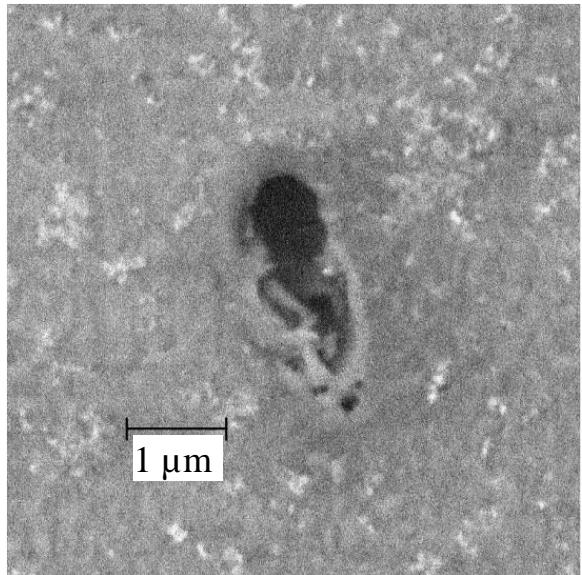
A. S. Vaughan, S. J. Dodd, and S. J. Sutton,
Journal Materials Science, Vol. 39, pp. 181-191, 2004.

Importancia del estudio de árboles eléctricos

- Mecanismos involucrados
- Mejoramiento del diseño de aislamientos y la gestión de activos
 - mejorar confiabilidad del sistema de potencia
 - alcanzar desafíos de reducción de tamaño y de pérdidas

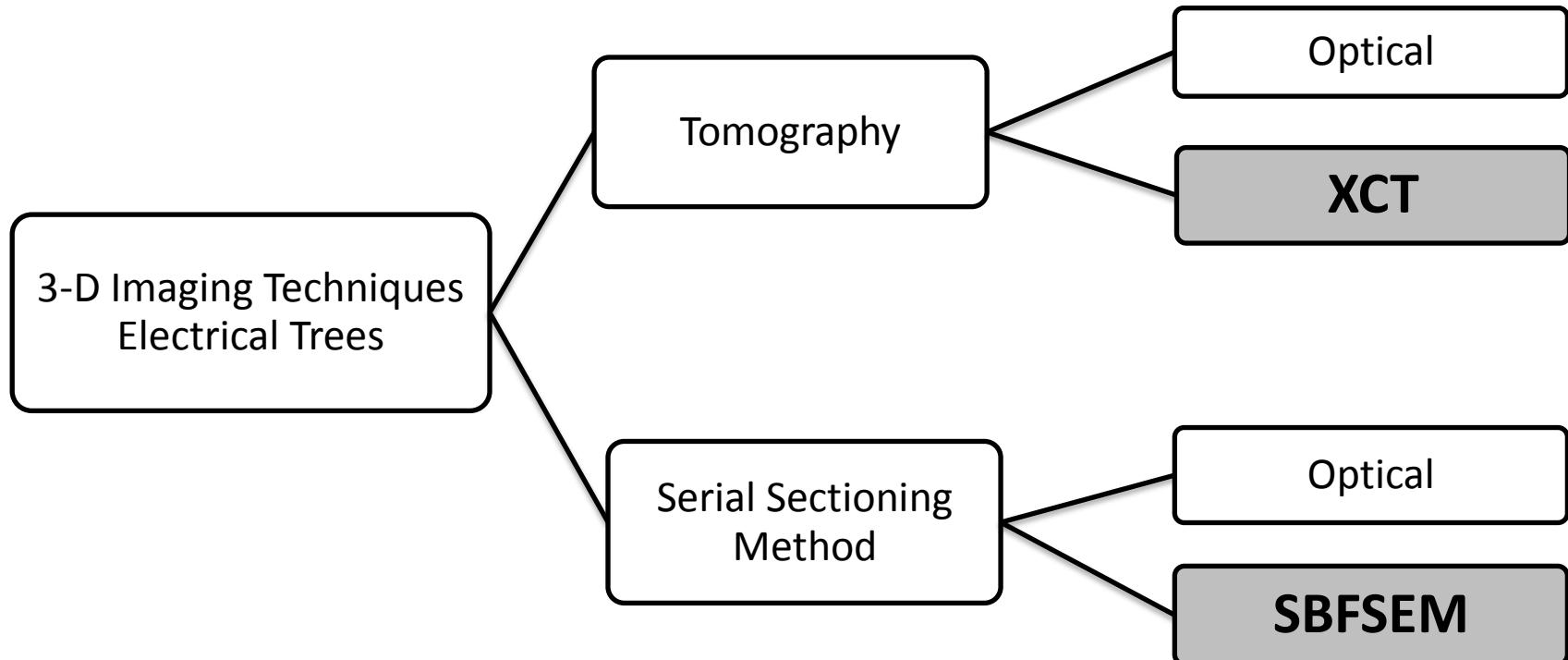
Enfoque tradicional de visualización: 2-D

- Microscopía optica



- Scanning Electron Microscopy (SEM)

- Red interconectada compleja: requiere 3D



1. Trasfondo
2. **Description experimental (ya hecho!)**
3. Modelos geométricos 3D (ya hecho!)
4. Temas: Caracterización y dimensión fractal

Methodology

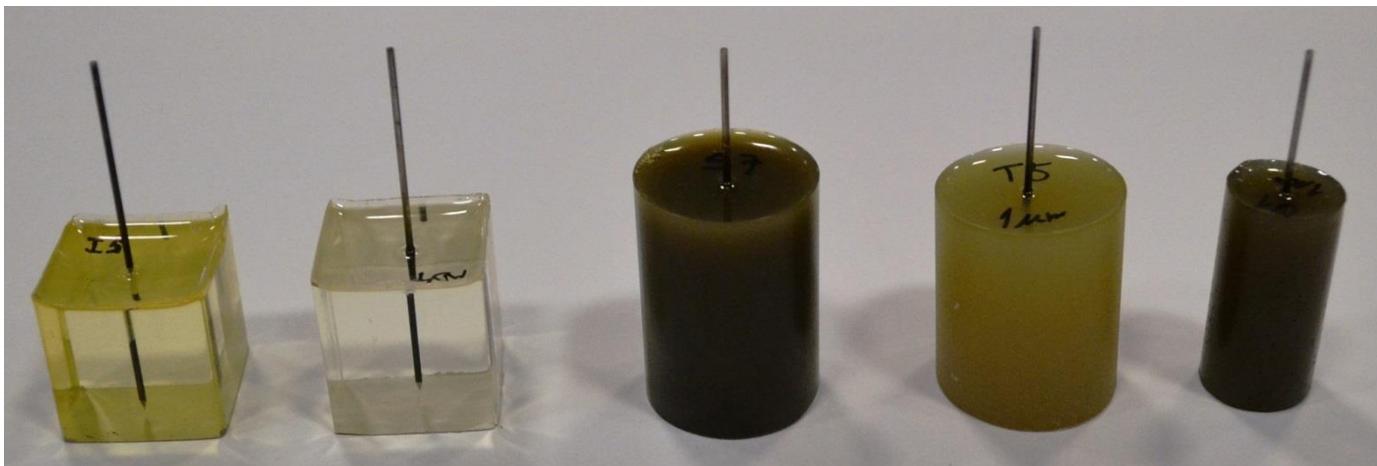


Procedure of imaging and analysis of electrical trees

Experimental Procedure (1)



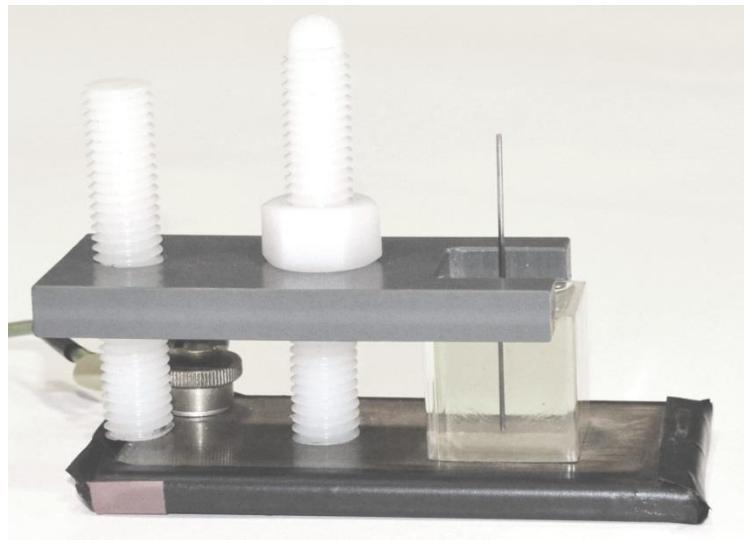
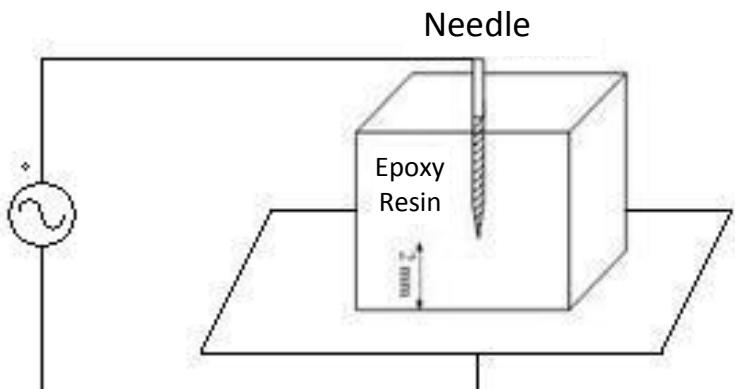
- Material: epoxy resin
- Conventional point-to-plane configuration



Experimental Procedure (2)



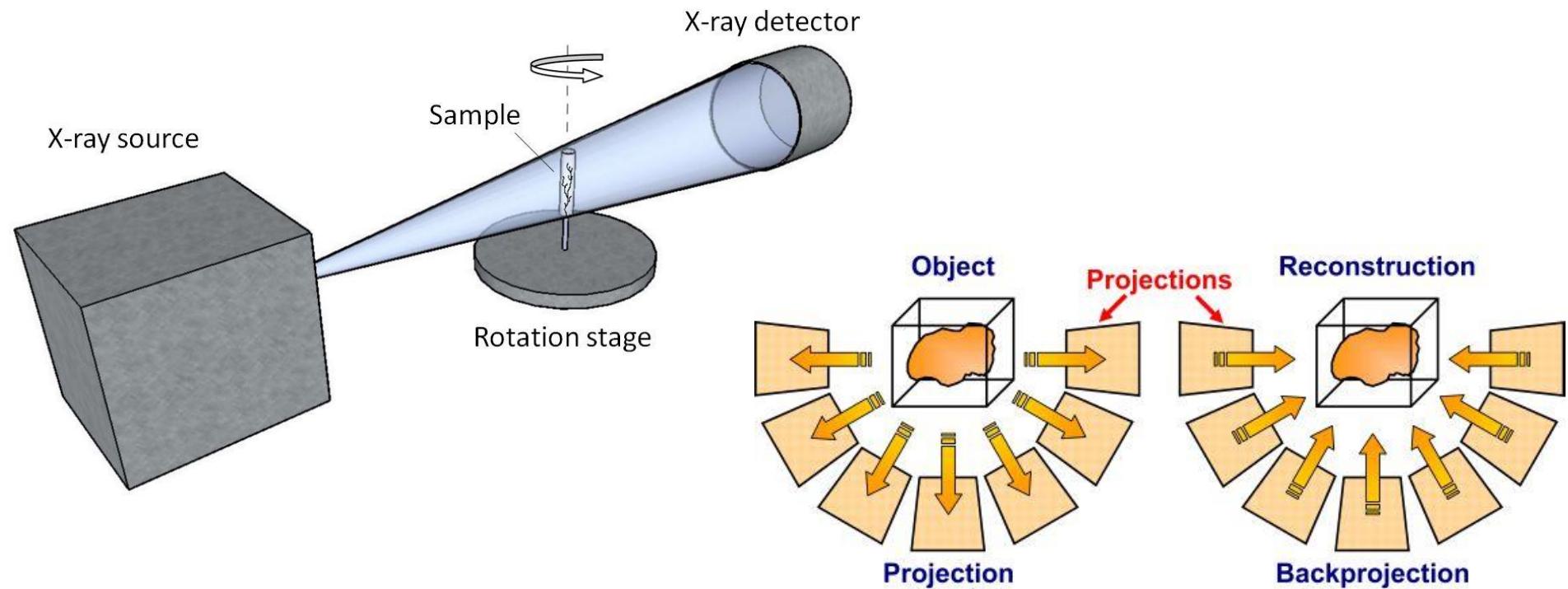
- Tree growth: High voltage (~ 10 kVrms) AC 50 Hz



Experimental Procedure (3a)



X-ray Computed Tomography (XCT)

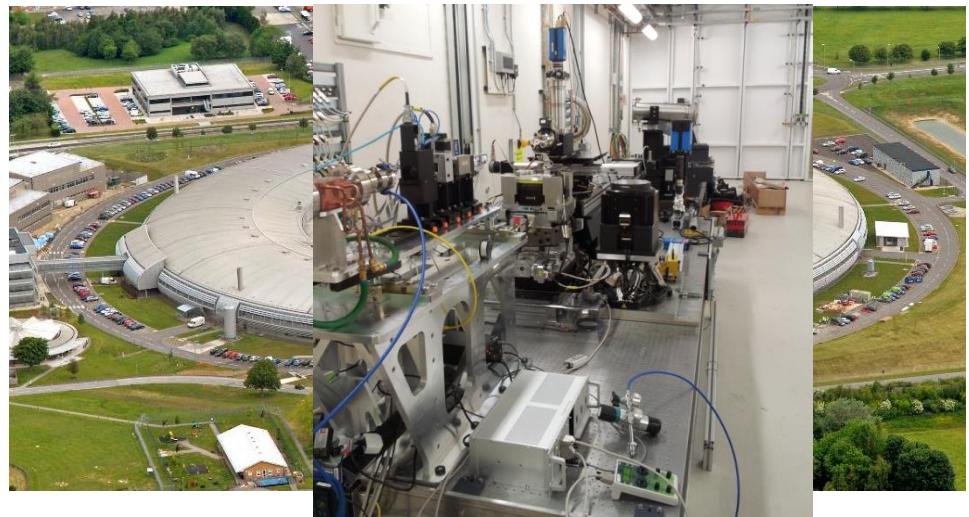


X-ray Computed Tomography (XCT)

Laboratorio

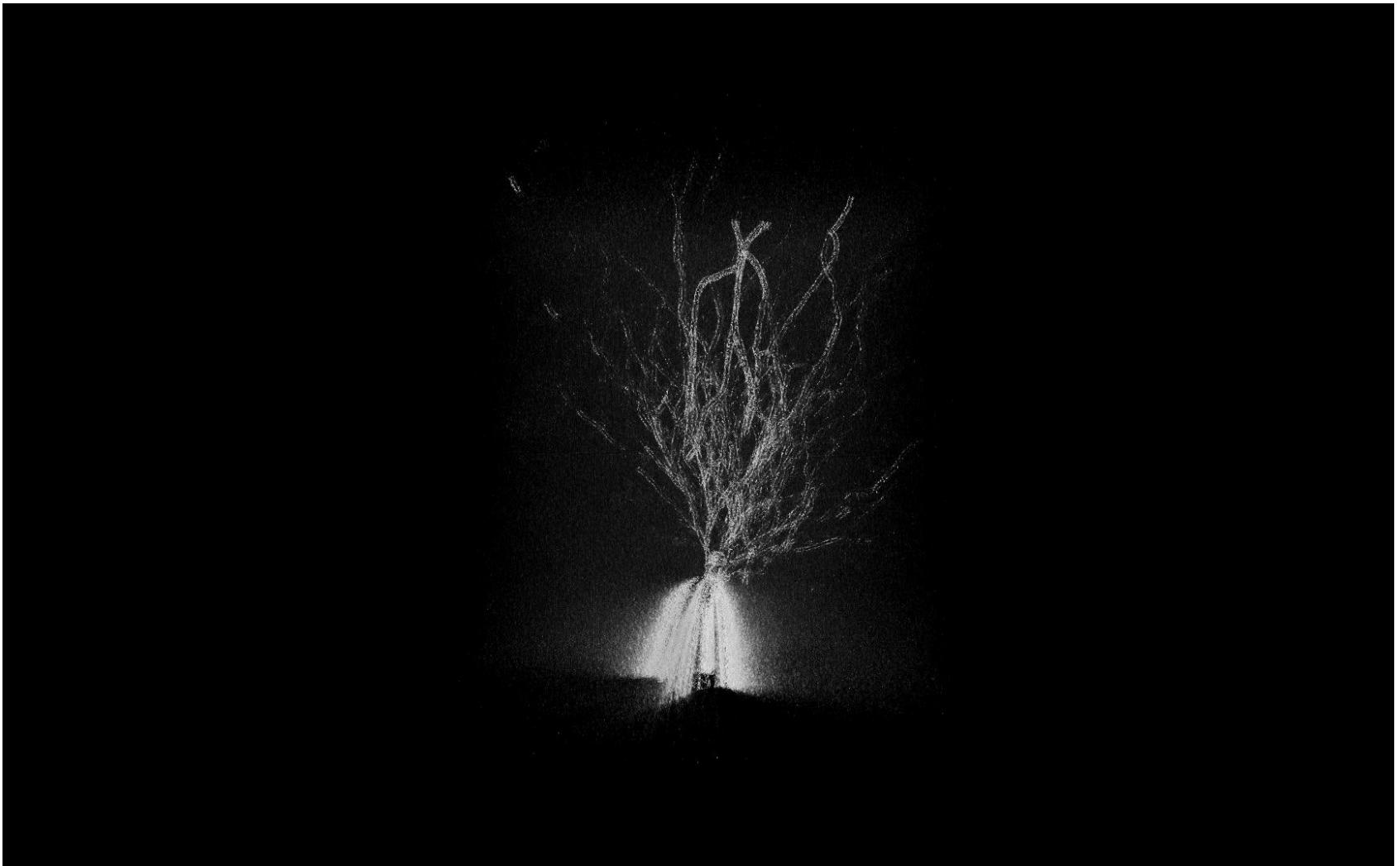


Sincrotrón





UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



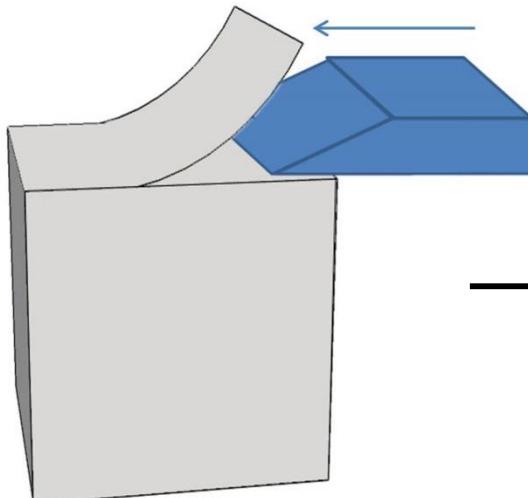
link

Experimental Procedure (3b)

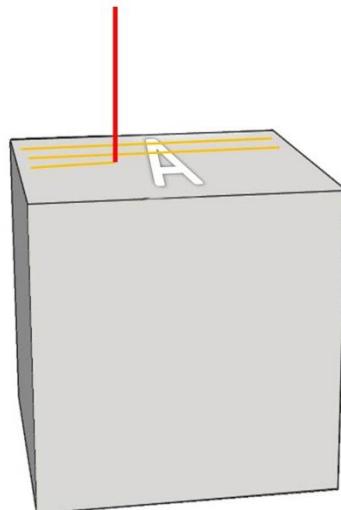


Serial Block-Face SEM (SBFSEM)

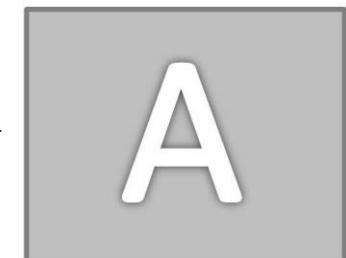
Slicing



SEM Imaging



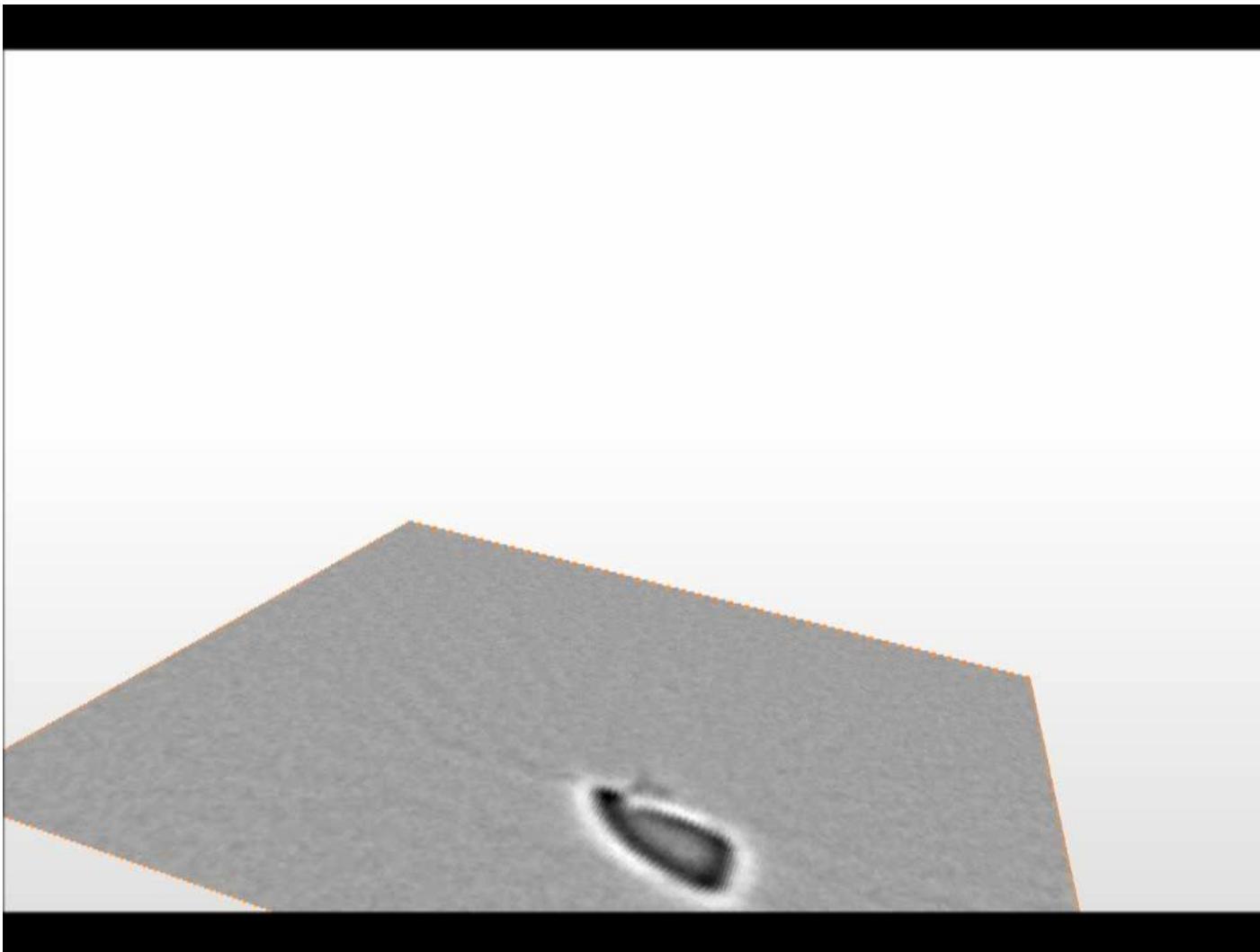
One Slice Imaged



SEM Case of study: microtoming process

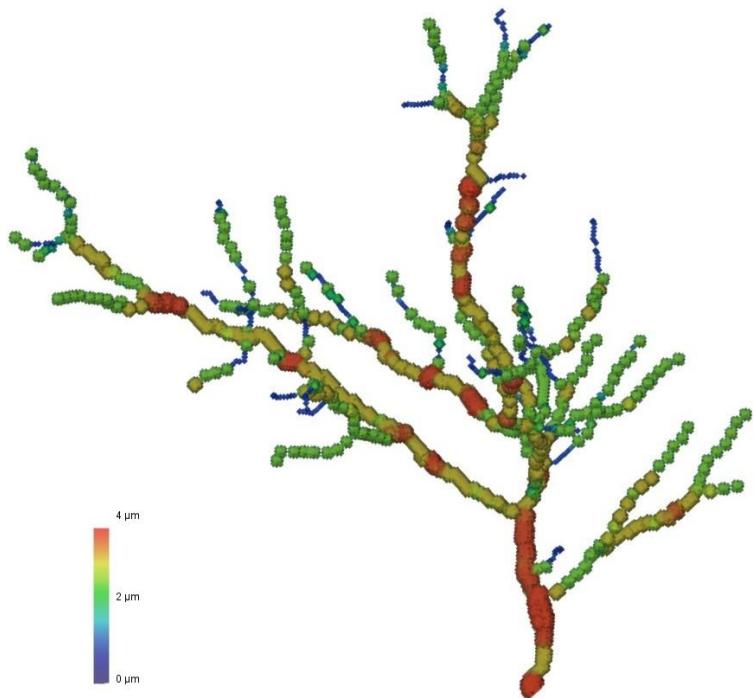


Experimental Procedure (4)



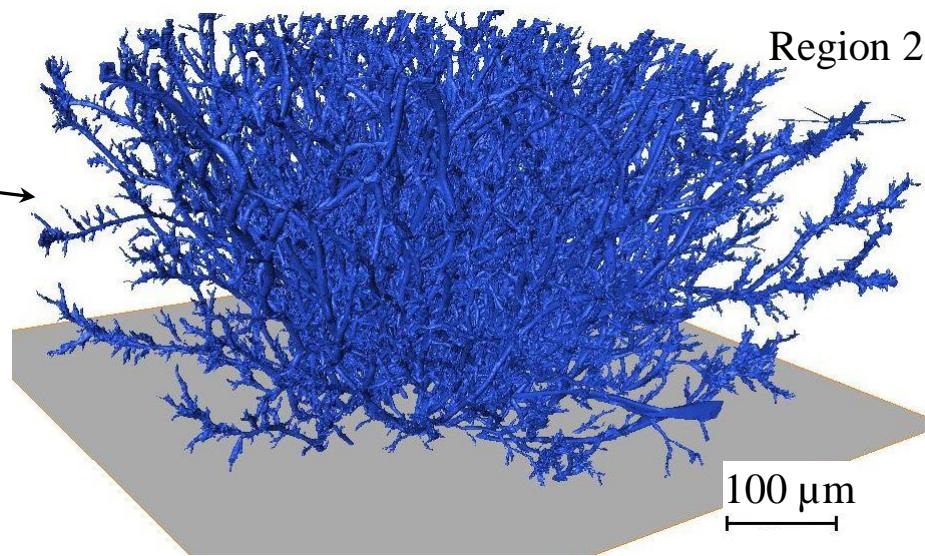
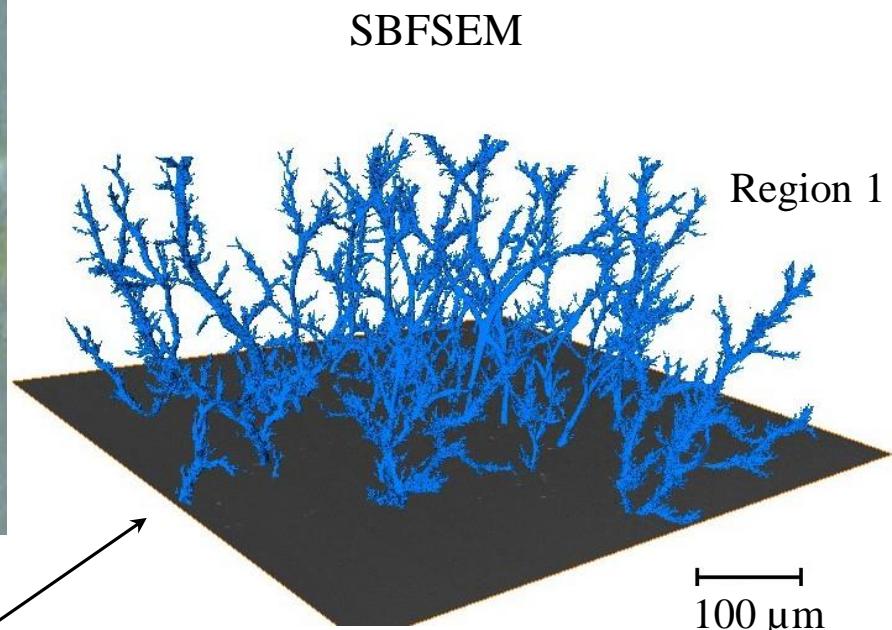
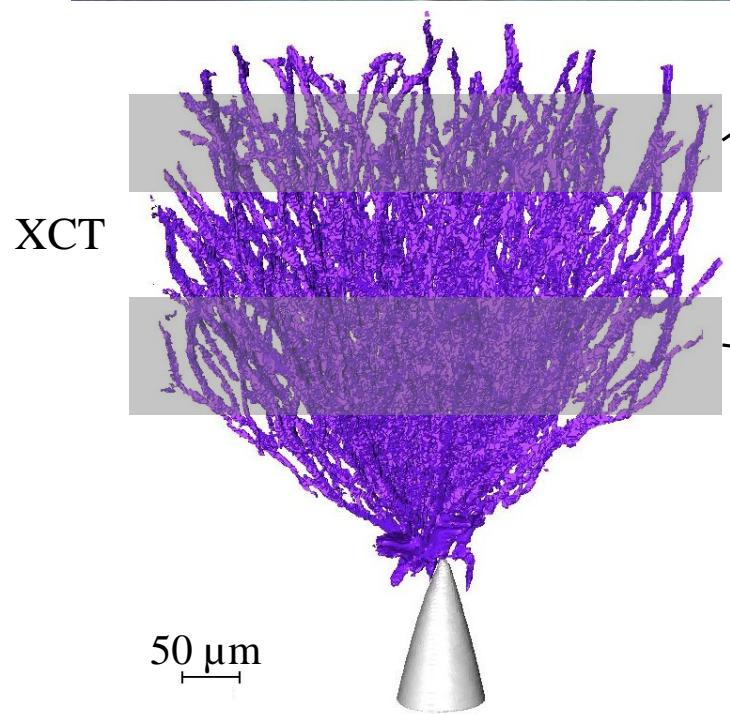
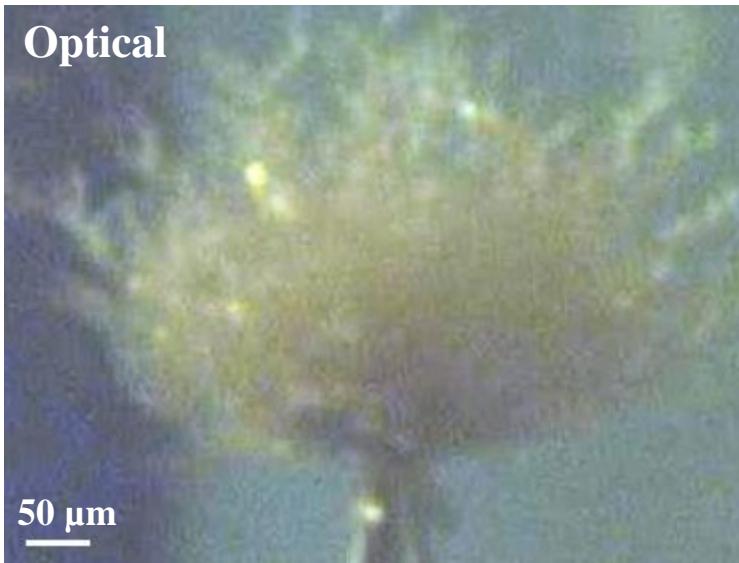
link

Experimental Procedure (5)



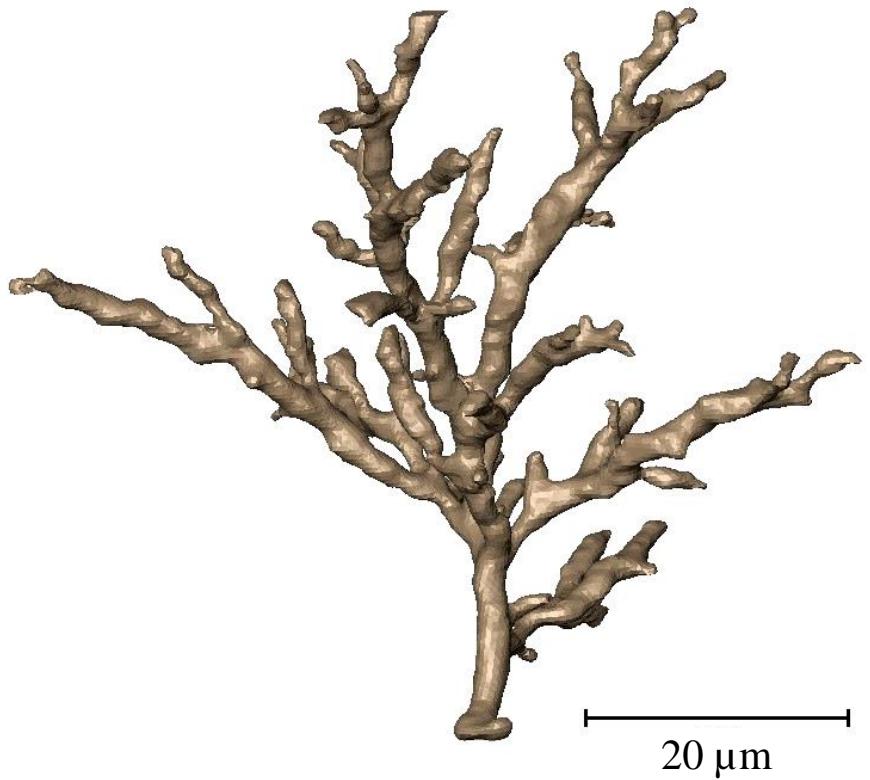
1. Trasfondo
2. Description experimental (ya hecho!)
- 3. Modelos geométricos 3D (ya hecho!)**
4. Temas: Caracterización y dimensión fractal

Sample 1

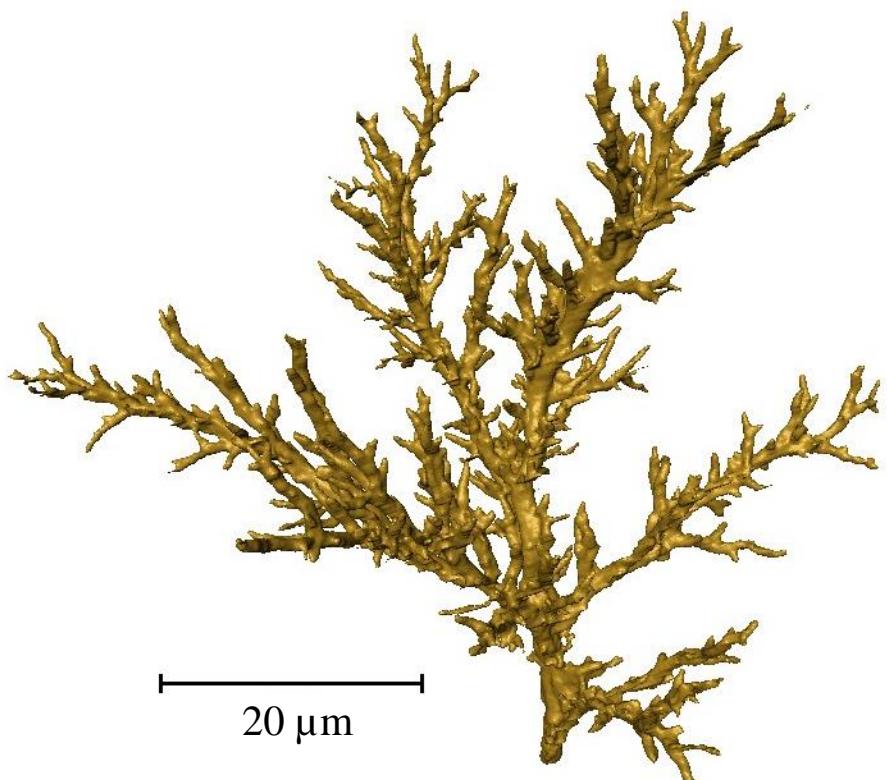


Sample 2

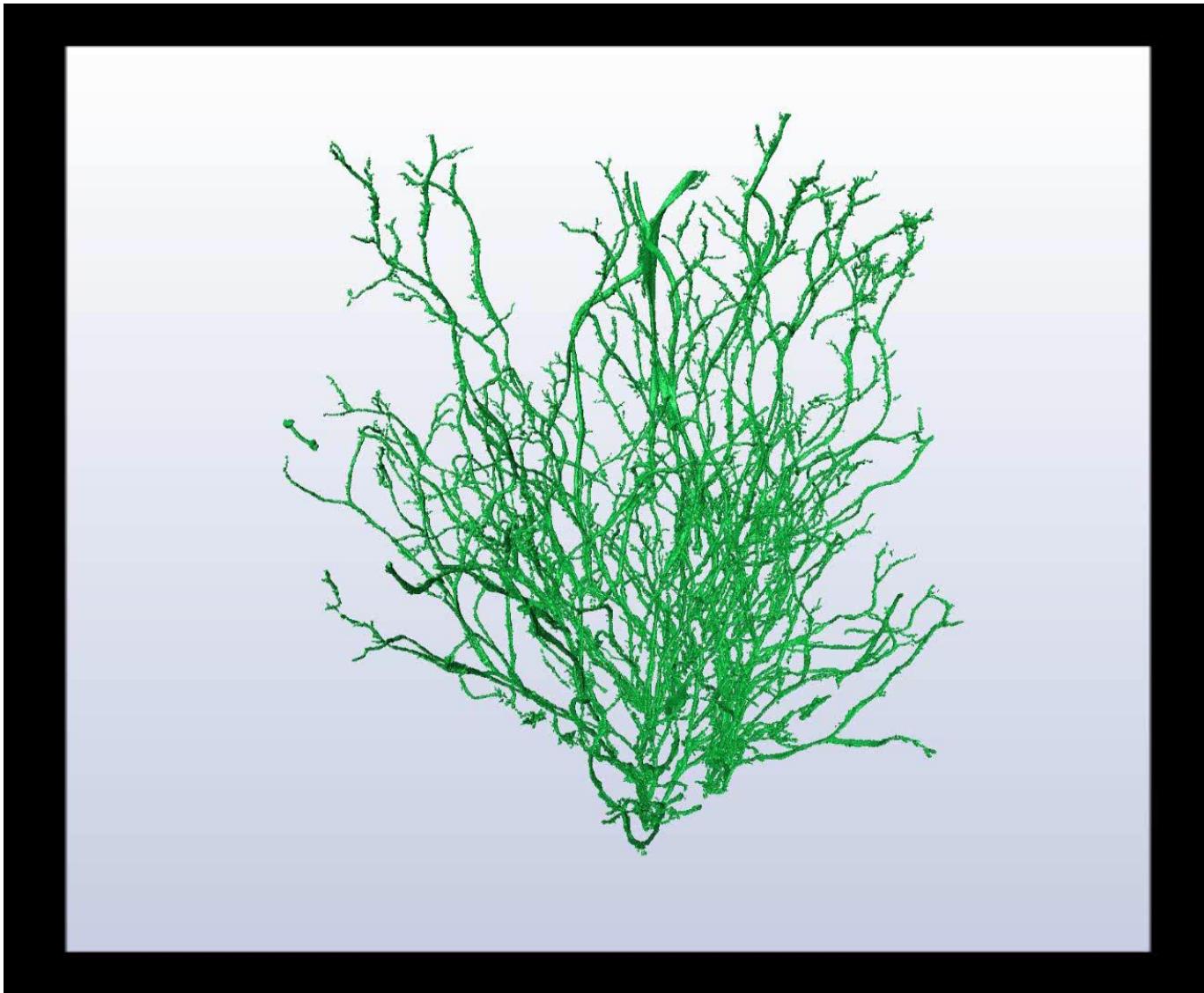
XCT (Laboratory)



SBFSEM



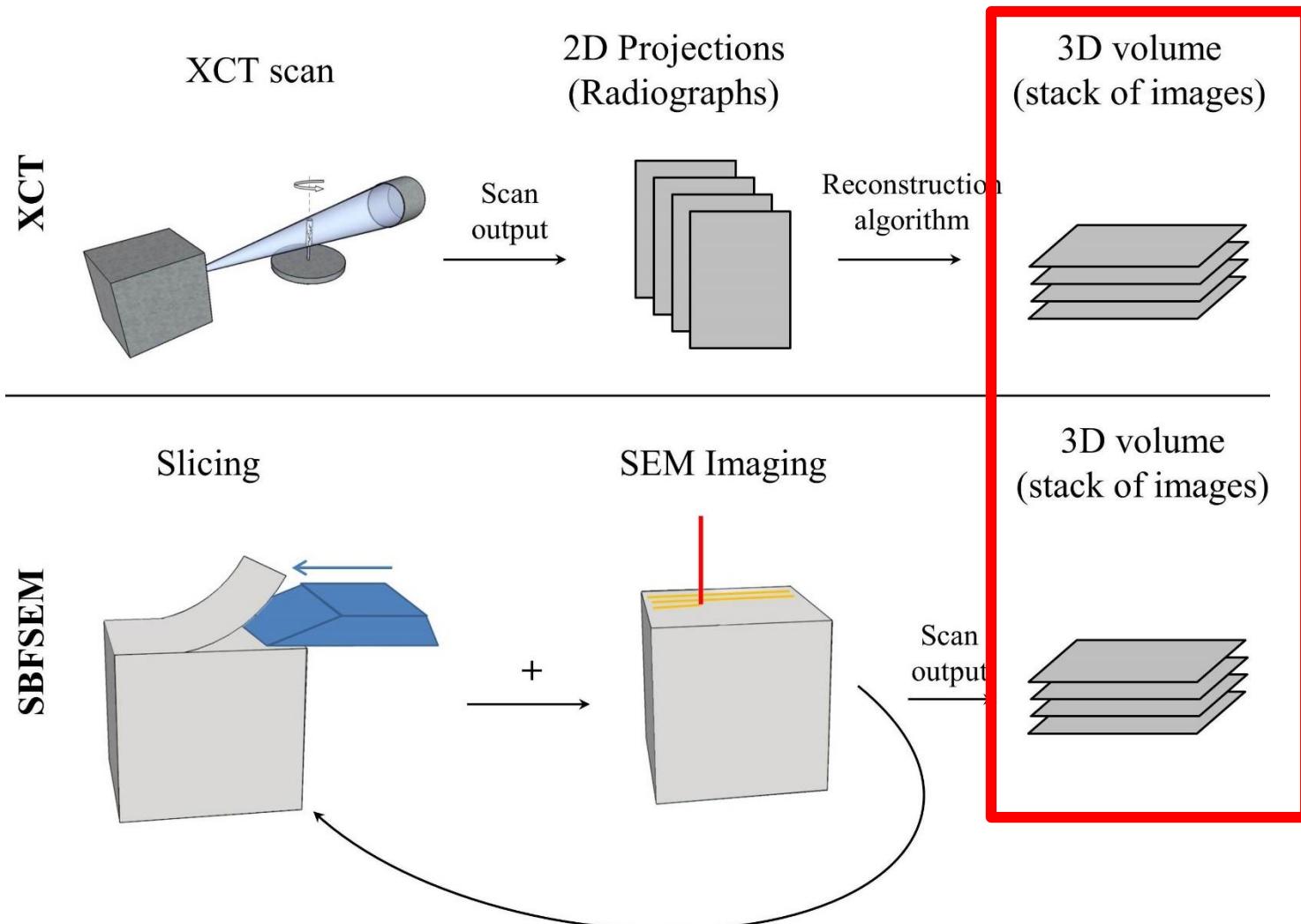
Sample 3 (animation)



link

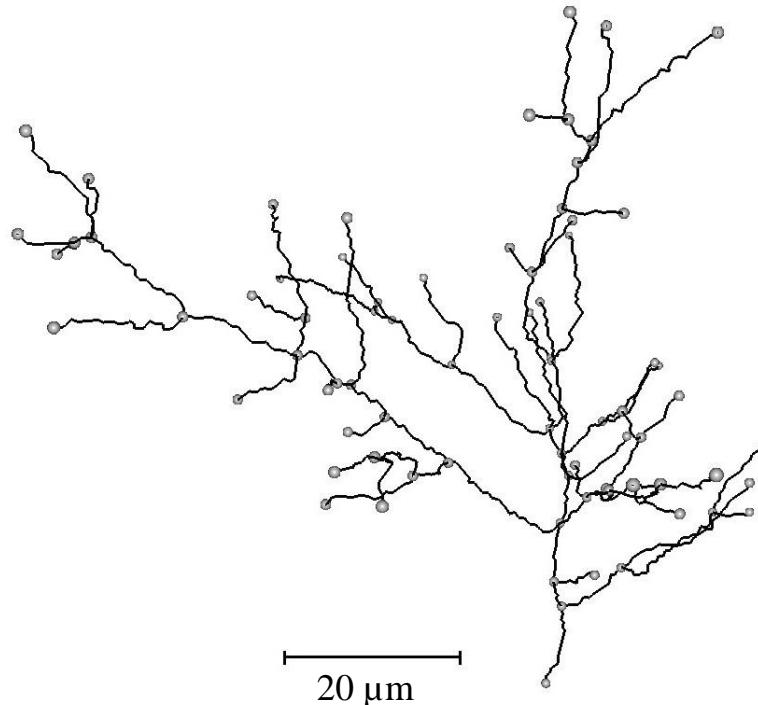
1. Trasfondo
2. Description experimental (ya hecho!)
3. Modelos geométricos 3D (ya hecho!)
4. **Temas: Caracterización y dimensión fractal**

La data disponible es una pila de imágenes 2D ya segmentadas

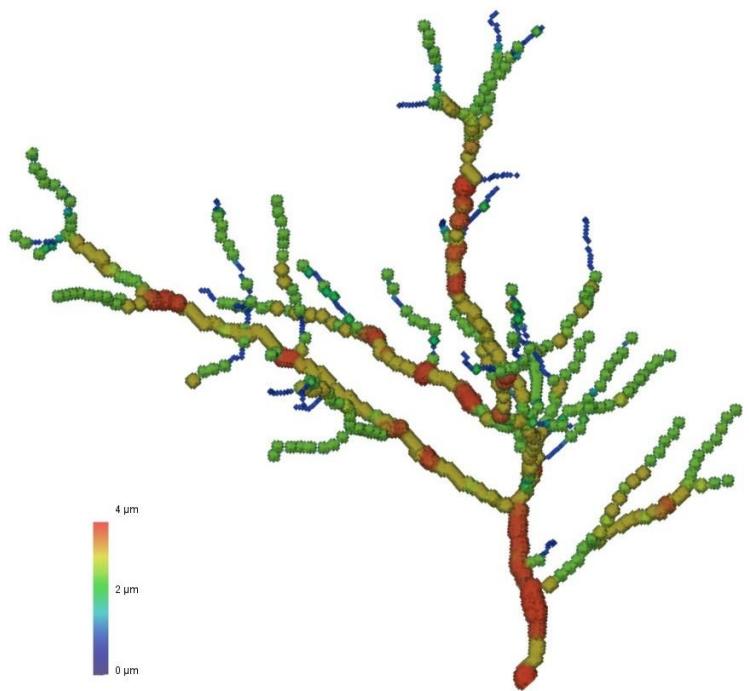
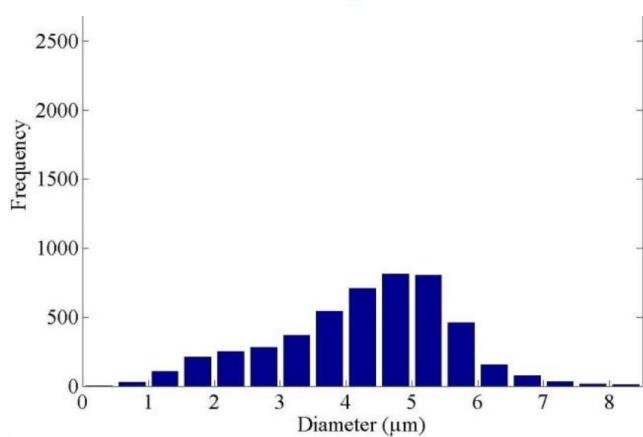
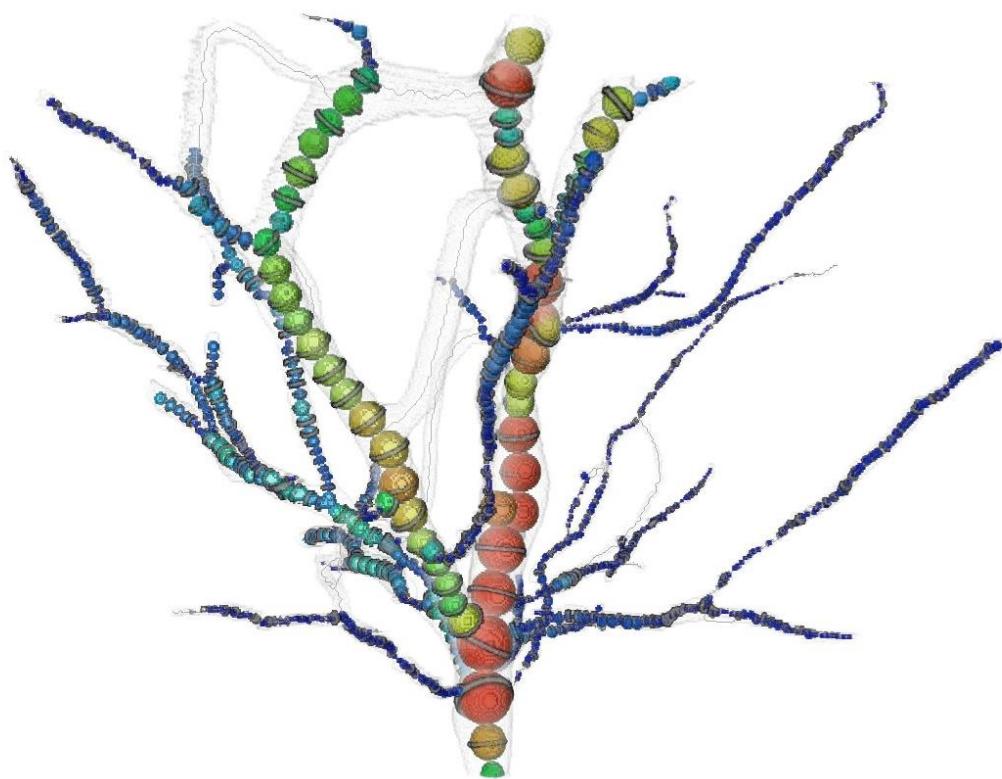


1. Grafos – Esqueleto del árbol

- Árboles eléctrico: estructura interconectada – segmentos y nodos (vértices).
- Se puede calcular: # nodos y segmentos, grado de conectividad, longitud segmentos, tortuosidad, ángulo de bifurcación, densidad de nodos, etc.



2. Cálculo del diámetro 3D

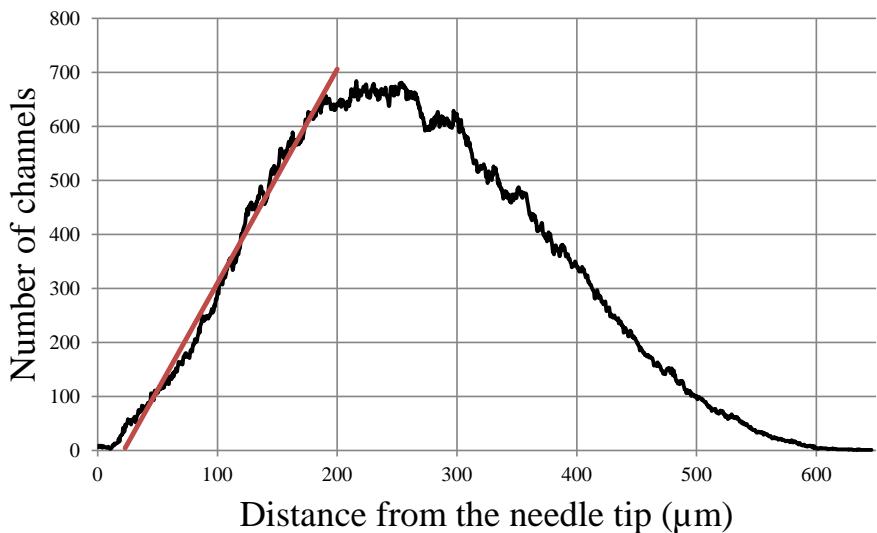


Ejemplo: Extensa caracterización

| Sample | U1 | U2 | U3 | U4 | T.E.-T.G | | | | | | | |
|-------------------|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Instrument | micro-XCT(ν_1) | SBFSEM_R1 | SBFSEM_R2 | micro-XCT(ν_2) | SBFSEM | micro-XCT(synchrot.) | micro-XCT(ν_2) | micro-XCT(ν_2-40X) | 1st micro-XCT(ν_2) | 2nd micro-XCT(ν_2) | 2 _{imp} micro-XCT(ν_2) | |
| Global parameters | Pixel size (xy / z) (μm) | 1.07 | 0.2/0.2 | 0.2/0.2 | 0.371 | 0.075/0.15 | 0.365 | 0.4535 | 0.2322 | 0.4535 | 0.4535 | 0.4509 |
| | Slices used | 356 | 1,273 | 1,567 | 160 | 456 | 2,300 | 1,589 | 461 | 176 | 1,333 | 1,434 |
| | Length (μm) | 381 | 255 | 313 | 59 | 68 | 839 | 720 | 107 | 80 | 605 | 647 |
| | Diameter (μm) | 4.4 (39%) | 3.3 (45%) | 4.5 (56%) | 2.0 (18%) | 1.0 (31%) | 2.6 (37%) | 3.1 (38%) | 1.2 (28%) | 2.6 (38%) | 3.7 (37%) | 2.5 (25%) |
| | Surface area (μm^2) | 1.70×10^6 | | | 3.50×10^3 | 4.56×10^3 | 7.02×10^5 | 7.67×10^5 | 2.49×10^5 | 4.29×10^4 | 2.48×10^6 | 2.60×10^6 |
| | Volume (μm^3) | 1.78×10^6 | 4.51×10^5 | 3.94×10^6 | 1.62×10^3 | 9.97×10^2 | 4.96×10^5 | 6.53×10^5 | 6.72×10^4 | 2.50×10^4 | 1.95×10^6 | 1.59×10^6 |
| | Conv. hull volume (μm^3) | 5.06×10^7 | 7.41×10^7 | 1.09×10^8 | 5.62×10^4 | 7.26×10^4 | 5.48×10^8 | 2.25×10^8 | 5.68×10^5 | 1.67×10^5 | 7.83×10^7 | 1.03×10^8 |
| | Surface/Volume (μm^{-1}) | 0.95 | | | 2.16 | 4.57 | 1.42 | 1.18 | 3.70 | 1.72 | 1.27 | 1.64 |
| | Volume/length (μm^2) | 4,672 | 1,769 | 12,588 | 27 | 15 | 591 | 907 | 628 | 313 | 3,227 | 2,453 |
| | Prop. volume degraded | 3.5% | 0.6% | 3.6% | 2.9% | 1.4% | 0.1% | 0.3% | 11.8% | 14.9% | 2.5% | 1.5% |
| Fractal | ^{3D} D _f | 2.23 | | | 1.69 | 1.84 | 1.80 | 1.94 | 2.33 | 2.12 | 2.18 | 2.16 |
| | <i>xy</i> ^{2D} D _f | 1.83 | | | 1.40 | 1.54 | 1.62 | 1.72 | 1.72 | 1.61 | 1.75 | 1.76 |
| | <i>xz</i> ^{2D} D _f | 1.83 | | | 1.42 | 1.58 | 1.66 | 1.75 | 1.73 | 1.58 | 1.76 | 1.79 |
| | <i>yz</i> ^{2D} D _f | 1.86 | | | 1.50 | 1.56 | 1.68 | 1.74 | 1.78 | 1.62 | 1.74 | 1.80 |
| Skeleton | Number of nodes | 5,040 | | | 78 | 504 | | 6,768 | 28,967 | 927 | 21,121 | 23,028 |
| | Number of segments | 6,191 | | | 78 | 510 | | 6,908 | 38,792 | 1,294 | 21,051 | 29,431 |
| | End point fraction | 0.2 | | | 0.5 | 0.5 | | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| | Node degree | 3.2 (16%) | | | 3.2 (12%) | 3.1 (11%) | | 3.1 (9%) | 3.4 (22%) | 3.3 (20%) | 3.1 (11%) | 3.1 (10%) |
| | Segment length (μm) | 17.3 (93%) | | | 7.3 (60%) | 3.0 (63%) | | 11.7 (118%) | 2.3 (63%) | 5.1 (60%) | 8.8 (94%) | 12.7 (86%) |
| | Tortuosity | 1.6 (37%) | | | 1.2 (6%) | 1.2 (7%) | | 2.5 (38%) | 1.5 (6%) | 1.6 (11%) | 1.6 (13%) | 1.5 (12%) |
| | Branch angle (deg) | 64 (47%) | | | 69 (39%) | 57 (48%) | | 63 (49%) | 69 (46%) | 67 (43%) | 64 (47%) | 60 (45%) |
| | Node density (μm^{-3}) | 2.8×10^{-3} | | | 4.8×10^{-2} | 5.1×10^{-1} | | 1.0×10^{-2} | 4.3×10^{-1} | 3.7×10^{-2} | 1.1×10^{-2} | 1.5×10^{-2} |
| | Seg. length/diameter | 3.9 | | | 3.7 | 3.1 | | 3.8 | 1.9 | 2.0 | 2.4 | 5.0 |

Ejemplo: Tipo bosque vs. rama

| Sample | U1 | U2 | U3 |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Description | Bush | Small branch | Low density bush |
| Mean Diameter (μm) | 4.4 | 2.0 | 3.1 |
| Volume/length (μm^2) | 4,672 | 27 | 907 |
| ${}^{3D}D_f$ Fractal dimension | 2.23 | 1.69 | 1.94 |
| Number of nodes | 5,040 | 78 | 6,768 |
| Nodes/Length (μm^{-1}) | 13 | 1 | 9 |
| Node density (μm^{-3}) | 2.8×10^{-3} | 4.8×10^{-2} | 1.0×10^{-2} |
| Mean Tortuosity | 1.6 | 1.2 | 2.5 |

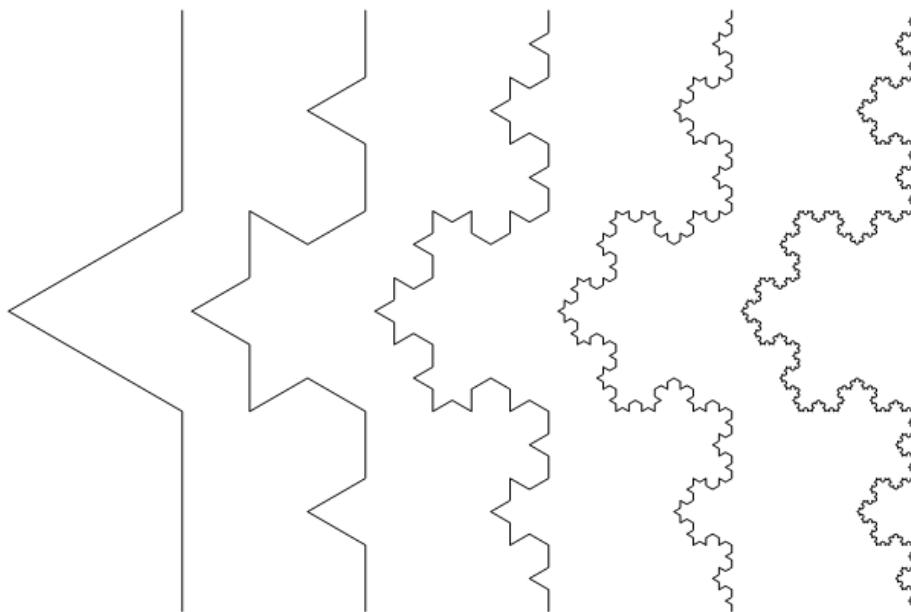


Pendiente (# canales):

Tipo bosque: $\sim 3\text{-}10$ canales/ μm
 Branch-type: < 1 canales/ μm

3. Fractales

- Benoit Mandelbrot (1975)
- Estructuras geométricas que se repiten a sí mismo (“self-similarity” - autosimilar)
- Fractal matemático (curva de Koch) vs. fractal natural (línea costera, árboles, etc.)



3. Dimensión fractal de árboles

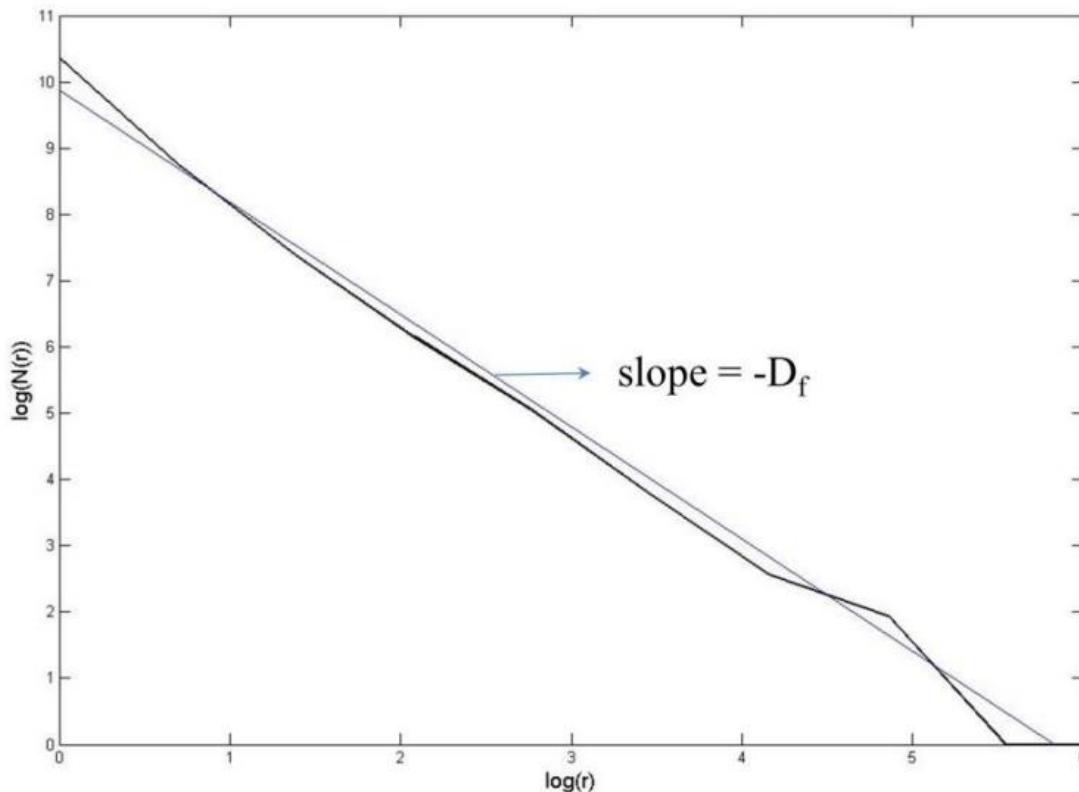
- Árboles eléctricos poseen estructura compleja que no es posible de describir analíticamente.
- La forma de los árboles eléctricos se describe a través de su dimensión fractal.
- Algunos modelos matemáticos de crecimiento de árboles eléctricos utilizan la dimensión fractal como uno de sus parámetros fundamentales.
- Árboles de dimensión fractal más pequeña crecen más rápido (son más peligrosos)

Cálculo de la dimensión fractal

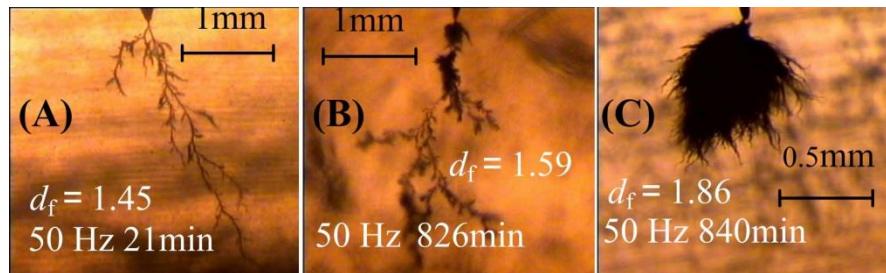
- Método de “box-counting”: el espacio es cubierto con “N” cubos de arista “r”.
- Se satisface relación

$$N(r) \propto r^{-D_f}$$

donde D_f es la dimensión fractal



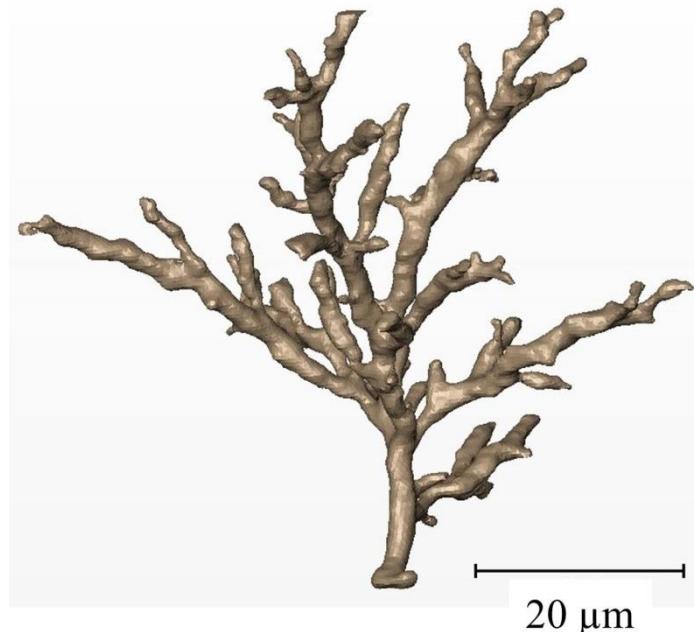
Ejemplo: Dimensión fractal 2D vs. 3D



Z. Xiaoquan and G. Chen,
IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 800-807, 2008

3D Model

$${}^3\text{D} D_f = 1.69$$



2D Projections



$$xy \text{ } {}^2\text{D} D_f = 1.40$$



$$xz \text{ } {}^2\text{D} D_f = 1.42$$



$$yz \text{ } {}^2\text{D} D_f = 1.50$$

Algunas preguntas a investigar

- ¿Qué elementos de la teoría de grafos ayudarían para caracterizar árboles eléctricos?
- ¿Cuál es la manera más eficiente y precisa de calcular el diámetro de las ramas?
- ¿Son los árboles eléctricos estructuras que podemos categorizar como fractales?
- ¿Es la dimensión fractal el mejor parámetro que caracteriza la forma de un árbol eléctrico?
- ¿Cuál es el mejor método para la estimación de la dimensión fractal en árboles eléctricos?
- ¿Cuál es la relación entre la dimensión fractal estimada desde una imagen 2D y la del objeto real 3D?
- ¿En qué error estaban incurriendo los investigadores al estimarla desde imágenes proyectadas 2D?

Para los que aún no encuentran su camino...

TEMA EXTRA:

La dinámica de las descargas parciales

Proceso dinámico no-lineal (determinístico)

Interesados contactar...