



Universidad  
Rey Juan Carlos

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA**

**GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA**

**Curso Académico 2023/2024**

**Trabajo de Fin de Grado**

Implementación de algoritmos para la representación de  
morfologías neuronales

**Autor:** Alberto Arcones Méndez

**Tutor:** Susana Mata Fernández  
**Cotutor:** Félix de las Pozas Álvarez

# **Grado en Ingeniería Informática**

## Índice

1. Introducción.....	5
1.1 Contextualización y motivación.....	5
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Metodología.....	9
1.4 Recursos.....	10
2. Estado del arte.....	11
2.1 Neurociencia.....	11
2.1.2 Funcionamiento de la neurona.....	11
2.1.2 Estructura neuronal.....	12
2.1.3 Organización columnar de la corteza cerebral.....	13
2.2 Human Brain Project.....	14
2.2.1 EBRAINS.....	14
2.2.2 NeuroScheme.....	15
2.3 HUGO.....	20
3. Desarrollo.....	25
3.1 Aplicación inicial independiente.....	25
3.1.1 Representación básica.....	25
3.1.2 Integración de biblioteca nsol.....	26
3.1.3 Representación tridimensional.....	27
3.1.4 Representación bidimensional árbol.....	28
3.1.5 Representación bidimensional dendrograma.....	30
3.1.6 Creación de variables.....	32
3.1.7 Interconexión entre representaciones.....	37
3.2 Análisis de NeuroScheme.....	38
3.3. Desarrollo en aplicación NeuroScheme.....	39
3.3.1 Contextualización.....	39
3.3.2 Desarrollo dendrograma.....	40
3.3.3 Configuración de variables.....	41
3.3.4 Visualización por capas.....	43
4. Resultados.....	47
4.1 Aplicación intermedia.....	47
4.2 Integración en NeuroScheme e incorporación de mejoras.....	48
4.3 Análisis del tiempo de ejecución.....	50
5. Conclusiones.....	53
6. Líneas futuras.....	55

## Grado en Ingeniería Informática

6.1. Añadir nuevas variables morfológicas a dendrograma .....	55
6.2. Posibilidad de continuar con la aplicación intermedia .....	55
6.3. Selección de neuronas en NeuroScheme .....	55
6.4. Añadir una representación 3D en NeuroScheme.....	55
7. Bibliografía.....	57

## 1.Introducción

### 1.1 Contextualización y motivación

La neurociencia es un campo interdisciplinario apasionante en constante desarrollo y con diversas ramas para seguir investigando y seguir haciendo descubrimientos que puedan mejorar la vida de las personas.

Esta ciencia combina una gran variedad de disciplinas, destacando la biología, la psicología, la física, la medicina, la matemática y la informática. Con ella, los humanos intentamos entender el órgano más enigmático y complejo del cuerpo humano, el cerebro. Este gran campo multidisciplinar nos ayuda a comprender los grandes misterios del cerebro, los pensamientos, las emociones y el comportamiento humano.

La importancia de la neurociencia radica en su intención de comprender todos los rincones de nuestra mente. Gracias a ella, podemos entender cómo percibimos el mundo, cómo almacenamos nuestros recuerdos y cómo tomamos decisiones en nuestra vida. Con este conocimiento obtenemos una mejor comprensión del ser humano y, además, abrimos nuevas vías para poder investigar más a fondo la salud mental y la neurología.

Es muy importante seguir investigando y alcanzar avances en este campo, puesto que nos puede ayudar a comprender diferentes trastornos cerebrales y cómo ayudar a solucionarlos. Con avances neurocientíficos podríamos ayudar a tratar enfermedades como la depresión o el Alzheimer (Ballesteros Jiménez, 2009). Se podrían abordar con terapias personalizadas y tratamientos innovadores basados en un profundo entendimiento del cerebro y sus neuronas. Gracias a la neurociencia, estamos un paso más cerca de obtener soluciones y así ayudar a millones de personas que luchan contra enfermedades mentales y neurológicas.

También cabe destacar que la neurociencia tiene relevancia más allá del ámbito clínico. Nos ayuda a replantearnos cuestiones filosóficas sobre la conciencia y la moralidad. ¿Somos conscientes de lo que hacemos o estamos únicamente sujetos a complejas interacciones de nuestras redes neuronales? Para contestar esta pregunta podemos pensar en el siguiente ejemplo, cuando una persona toca con su mano algo que está ardiendo quita la mano rápidamente debido a que el sistema nervioso periférico manda un impulso al cerebro y este reacciona, no siendo algo pensado ni consciente. ¿Existen más aspectos de la vida en los que actuemos automáticamente, guiados únicamente por impulsos neuronales?

## Grado en Ingeniería Informática

Por otra parte, la neurociencia tiene una suma importancia en diversos campos como la educación y la justicia. Entender cómo aprende el cerebro puede cambiar la forma en la que enseñamos en los colegios. Desde crear nuevas metodologías a la hora de enseñar a escribir, hasta aprender nuevos métodos de estudio, memorización y comprensión. En cuanto a la justicia, se podrían crear políticas públicas más efectivas y equitativas gracias a comprender la influencia del cerebro humano en nuestro comportamiento. Además de ayudar a sanar a personas con problemas mentales que puedan conllevar o que hayan conllevado a delitos.

La neurociencia no es solo una disciplina con aplicaciones meramente científicas, sino que tiene una gran utilidad en nuestra sociedad y puede ayudarnos a conseguir grandes avances para la humanidad. Como dijo Jean-Pierre Changeux, “Se trata de la ciencia del futuro, del porvenir. La física todavía tiene cosas por descubrir. Se conoce mucho sobre el átomo, sobre la estructura de la materia, sobre las galaxias. Pero todavía queda mucho por hacer. Creo que la gran incógnita actual es el cerebro del hombre... Comprender qué somos. Qué es el hombre.”

Dentro del contexto de la neurociencia, es necesario comprender las diversas formas existentes de representación de las morfologías neuronales y de las estructuras cerebrales entre las que destacan la existencia tanto de representaciones esquemáticas como de representaciones realistas.

La existencia de las representaciones esquemáticas es de gran ayuda puesto que hace más sencillo comprender una neurona sin entrar a un alto nivel de detalle, se puede comparar entre una gran variedad de neuronas para encontrar diferentes similitudes y diferencias, además de poder agruparlas por distintos parámetros morfológicos para comprender como funcionan.

En comparación con una representación realista, una representación simbólica puede ser útil cuando existen grandes volúmenes de datos puesto que, en una representación realista, existe una complejidad visual que hace complicada la tarea de entender las distintas neuronas y por ello es más complejo visualizar diferencias ya que las neuronas están tan solapadas que no se consigue una buena visualización. En cambio, usando la representación simbólica es posible visualizar de manera esquemática grandes volúmenes de datos y detectar la información necesaria para las investigaciones.

## Grado en Ingeniería Informática

También es destacable la enorme complejidad cognitiva que conlleva una representación realista, mientras que una representación simbólica es más sencilla de comprender.

Por otro lado, la complejidad computacional para generar visualizaciones es menor en la representación esquemática ya que se utilizan menos elementos y con menos coste computacional que una representación realista. Gracias a ello, se evita tiempo de espera innecesario que haría que las visualizaciones fueran menos fluidas, perdiendo interactividad, lo que resulta en una menor utilidad para las investigaciones.

Cabe destacar, que la idea fundamental de la visualización simbólica es representar la información más relevante, ocultando los detalles menos importantes. En ciertas ocasiones, al ocultarse los detalles menos relevantes, existe la necesidad de complementar la visualización con la representación realista. Ambas son muy útiles y gracias a la información que es posible obtener se pueden conseguir avances neurocientíficos que ayudarán a comprender mejor el comportamiento del ser humano.

El desarrollo de esta representación se hace bajo el marco del Human Brain Project (HBP) (Amunts et al., 2016). El HBP es un ambicioso proyecto europeo que busca comprender el funcionamiento del cerebro humano con la ayuda de las distintas disciplinas mencionadas anteriormente como la medicina y la informática. El proyecto se lanzó en 2013 para construir una infraestructura que permitiera simular y comprender los diversos procesos neuronales.

En este marco de investigaciones se han conseguido diversos avances como simular la actividad neuronal con un nivel de detalle sin precedentes, gracias a ello se puede explorar cómo se forman los pensamientos y emociones.

Otro de sus grandes avances ha sido en el campo de la neurotecnología, ya que este proyecto ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías y representaciones para estudiar el cerebro. Incluyendo técnicas de alta resolución de imágenes cerebrales, representaciones realistas y representaciones esquemáticas.

En el HBP se han usado además técnicas de Big Data y de supercomputación para analizar y gestionar grandes volúmenes de datos. Con ello los neurocientíficos pueden identificar patrones y correlaciones entre los datos para ayudarse en sus investigaciones.

Todos estos avances pueden ser usados en aplicaciones clínicas para el diagnóstico y tratamiento de trastornos neurológicos y psiquiátricos.

# Grado en Ingeniería Informática

En este entorno, añadir la representación simbólica puede complementar de gran manera los datos y podrá ayudar a conseguir información relevante y encontrar soluciones que ayuden a nuestra sociedad.

La representación simbólica que se va a implementar se fundamenta en una aplicación denominada HUGO (Aliaga Maraver et al., 2022), desarrollada por José Juan Aliaga Maraver en el marco de su trabajo de doctorado. HUGO se creó para facilitar la visualización de diversas neuronas mediante representaciones simbólicas, permitiendo su estudio en detalle. Esta aplicación se desarrolló como parte de su tesis doctoral con grandes resultados, se desarrolló en el lenguaje de programación Java y opera externamente al marco de proyecto HBP. A través de ella se puede obtener multitud de información de las neuronas y por ello, puede ser una fuente de información muy relevante para el desarrollo de diversas investigaciones neurocientíficas.

Poder integrar esta herramienta desarrollada por José Juan Aliaga en el entorno software del proyecto HBP, es un gran desafío que puede concluir en un gran resultado al unir dos proyectos que combinarán de forma excepcional.

## 1.2 Objetivos

El objetivo del presente proyecto es trabajar en el marco del Human Brain Project, concretamente sobre la aplicación NeuroScheme, la cual se tratará de modificar añadiendo visualizaciones complementarias a las ya existentes. Dichas visualizaciones fueron las desarrolladas por José Juan Aliaga en HUGO.

El objetivo principal de este trabajo es implementar los algoritmos necesarios para crear un visualizador que represente de forma esquemática la morfología neuronal descrita anteriormente y fusionarla con el marco de trabajo de NeuroScheme. Haciendo un desglose de este objetivo se encuentran los siguientes subobjetivos:

- **Desarrollar una aplicación intermedia:** El primer objetivo será desarrollar una aplicación intermedia, previa a la integración en el entorno de NeuroScheme, con la intención de implementar los algoritmos necesarios para visualizar la representación simbólica de la morfología neuronal y la creación de sus distintas variables morfológicas. Asimismo, en este punto, se familiarizará con el lenguaje C++, y con las distintas herramientas que se usarán OpenGL y Qt.



## Grado en Ingeniería Informática

- **Familiarizarse con el software de NeuroScheme:** Una vez desarrollada la aplicación intermedia, el siguiente objetivo será familiarizarse con la aplicación NeuroScheme, las clases que ella contiene y las diferentes librerías que utiliza.
- **Integrar las visualizaciones en NeuroScheme:** Se integrarán los métodos desarrollados dentro del marco de visualización de NeuroScheme ya existente que fue desarrollado por el grupo VgLab.
- **Añadir mejoras a la representación inicial:** Por último, se añadirán mejoras dentro de la aplicación NeuroScheme a las representaciones simbólicas desarrolladas en el primer paso.

### 1.3 Metodología

En este apartado se va a explicar la metodología que se seguirá a la hora de desarrollar el presente trabajo:

- **Análisis de NeuroScheme:** Antes de empezar a desarrollar, es esencial comprender el marco sobre el que se va a trabajar. Para ello, se analizará NeuroScheme tratando de encontrar diversas líneas de mejora.
- **Análisis de Hugo:** Es imprescindible comprender y familiarizarse con la aplicación que se integrará en NeuroScheme. Para ello, se analizará Hugo y se seleccionaran las representaciones que mejor combinen en la integración.
- **Estudio bibliográfico:** En este segundo paso, se investigará sobre diversas aplicaciones de características similares a NeuroScheme para mejorar en los conocimientos sobre este campo. Además, es esencial familiarizarse con el funcionamiento de las neuronas para un mejor desarrollo.
- **Diseño:** Una vez comprendido NeuroScheme y Hugo, el siguiente paso será diseñar los distintos algoritmos y las distintas visualizaciones que se implementarán en la aplicación. Para ello, se desarrollará una aplicación intermedia con los distintos algoritmos.
- **Implementación:** Una vez finalizada la etapa de diseño, se implementarán las visualizaciones creadas en el paso anterior en el marco de trabajo NeuroScheme.
- **Diseño de pruebas:** En este punto se realizarán diversas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del software desarrollado.

## Grado en Ingeniería Informática

- **Recolección de datos y análisis de resultados:** Una vez finalizado el desarrollo, es importante recolectar los datos obtenidos y analizar los resultados para corroborar el cumplimiento de los objetivos.

### 1.4 Recursos

El presente proyecto será realizado dentro del grupo de investigación VgLab (Visualization & Graphics Lab), es un grupo de investigación formado por integrantes de la URJC y de la UPM que se dedica a desarrollar nuevas técnicas de visualización científica de datos complejos. Siendo uno de los múltiples proyectos en los que están involucrados el HBP.

En consecuencia, durante la realización del proyecto se tendrá acceso a los diversos datos procedentes del Human Brain Project. Asimismo, se contará con acceso a las distintas librerías desarrolladas por el grupo, entre las cuales se encuentra nsol, una librería que contiene distintos métodos para acceder a distintas características de las neuronas. Además, se contará con acceso los distintos softwares previamente desarrollados por el grupo tales como NeuroTessMesh, VisSimpl y NeuroScheme. Siendo el último citado en el que se centrará este proyecto.

Adicionalmente, se contará con imágenes de la representación creada en HUGO y que complementará la ya existente en NeuroScheme. Asimismo, el creador de las mismas José Juan Aliaga hará de soporte y ayuda ante las diversas dudas que surjan durante el proyecto.

## 2. Estado del arte

Para comprender mejor el presente proyecto, es imprescindible introducir aspectos importantes que es necesario conocer, entre ellos, la morfología neuronal y los métodos que existen para representarla. Además de conocer más a fondo el proyecto Human Brain Project y la aplicación NeuroScheme.

### 2.1 Neurociencia

La neurociencia es la disciplina científica encargada de estudiar el sistema nervioso y todos los elementos que forman parte de ella. Está en constante desarrollo y se realizan cientos de investigaciones mundialmente para avanzar en su conocimiento. Tradicionalmente, el campo más importante relacionado con la neurociencia ha sido la biología, pero en ella, también participan otras disciplinas como la matemática, la informática, la química y la filosofía. Dentro de los diversos campos de estudio que existen, el presente proyecto se centrará en el estudio de la morfología neuronal y su representación usando para este propósito distintas tecnologías informáticas. En consecuencia, es importante conocer el funcionamiento y la estructura neuronal.

#### 2.1.2 Funcionamiento de la neurona

El funcionamiento de una neurona se basa en recibir información, procesar la misma y posteriormente transmitirla a otra neurona, a glándulas o a músculos. (Duque Parra, 1997)

El proceso de recibir información se realiza mediante señales sinápticas, estas señales pueden ser de dos tipos, siendo el primero de ellos mucho más común que el segundo.

- **Sinapsis Química:** En este caso, las señales que contienen la información se reciben mediante neurotransmisores.
- **Sinapsis Eléctrica:** Las señales se reciben gracias a uniones GAP, estas uniones son estructuras especializadas que permiten la conexión directa entre dos células.

El procesamiento de la información se encarga esencialmente de decidir si la información se sigue transmitiendo. Debido a ello, el flujo de información continuará si se sobrepasa un umbral establecido dentro de la neurona.

## Grado en Ingeniería Informática

En último lugar, se encuentra la transmisión de la información, la cual se enviará mediante una señal eléctrica a la célula correspondiente de recibirla. Si es otra neurona, repetirá los mismos pasos que su homóloga.

### 2.1.2 Estructura neuronal

Para conocer más sobre el tema y la aplicación que se va a desarrollar es imprescindible conocer la morfología de las neuronas y las diferentes partes que serán representadas en el visualizador. Las neuronas están compuestas por diversas estructuras, siendo las más importantes y aquellas que van a formar parte de nuestro visualizador las siguientes:

- **Dendritas:** Son prolongaciones ramificadas de la neurona encargadas de obtener información exterior.
- **Soma o Cuerpo Celular:** Es el encargado de los procesos metabólicos de la neurona. En él, como en el resto de las células, se encuentra el núcleo y el citoplasma.
- **Axón:** Hace el funcionamiento inverso de las dendritas, es el encargado de transmitir la información a la célula receptora.

La aplicación, se encargará de representar las regiones citadas anteriormente, pero adicionalmente, las neuronas cuentan con las siguientes estructuras:

- **Vaina de mielina:** Es una sustancia de grasa y proteínas que rodea el axón y es imprescindible para el funcionamiento de los impulsos eléctricos del mismo.
- **Célula de Schwann:** Participa en la formación de las vainas de mielina y proporciona un soporte estructural y nutricional a las neuronas periféricas.
- **Nódulos de Ranvier:** Es la separación que hay entre cada vaina de mielina, puesto que estas no son continuas a lo largo del axón.
- **Axón terminal:** Son las ramificaciones que tiene el axón en su parte terminal y se encargan de liberar los neurotransmisores para que sean captado por la siguiente célula.

A continuación, en la Figura 1, se verán reflejadas las distintas partes de la neurona:

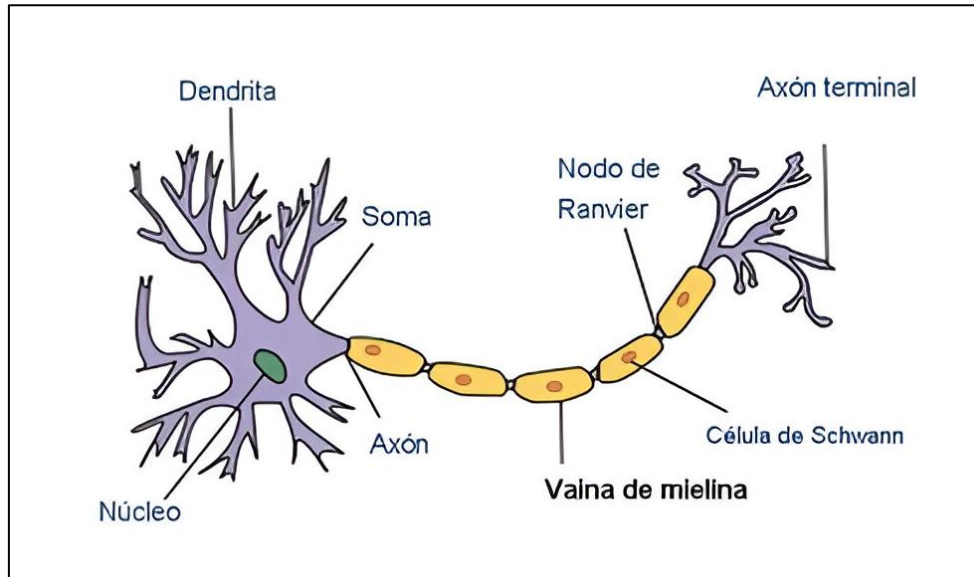


Figura 1. Representación de la estructura neuronal y sus componentes. (Visor de Libros, n.d.)

Las neuronas, aunque comparten las mismas estructuras básicas, no son todas iguales, se pueden diferenciar entre neuronas sensitivas, motoras e interneuronas. Las neuronas sensitivas o aferentes son las encargadas de conducir impulsos nerviosos desde la periferia hacia el sistema nervioso. Por su parte, las neuronas motoras o eferentes se encargan de lo contrario, conducen los impulsos desde el sistema nervioso a la periferia. Por último, se encuentran las interneuronas que modulan la interacción entre las anteriores.

### 2.1.3 Organización columnar de la corteza cerebral

Las neuronas están distribuidas por el sistema nervioso, están en el cerebro, la medula espinal y los nervios periféricos. Este apartado se centrará en la organización de las estructuras neuronales en el cerebro.

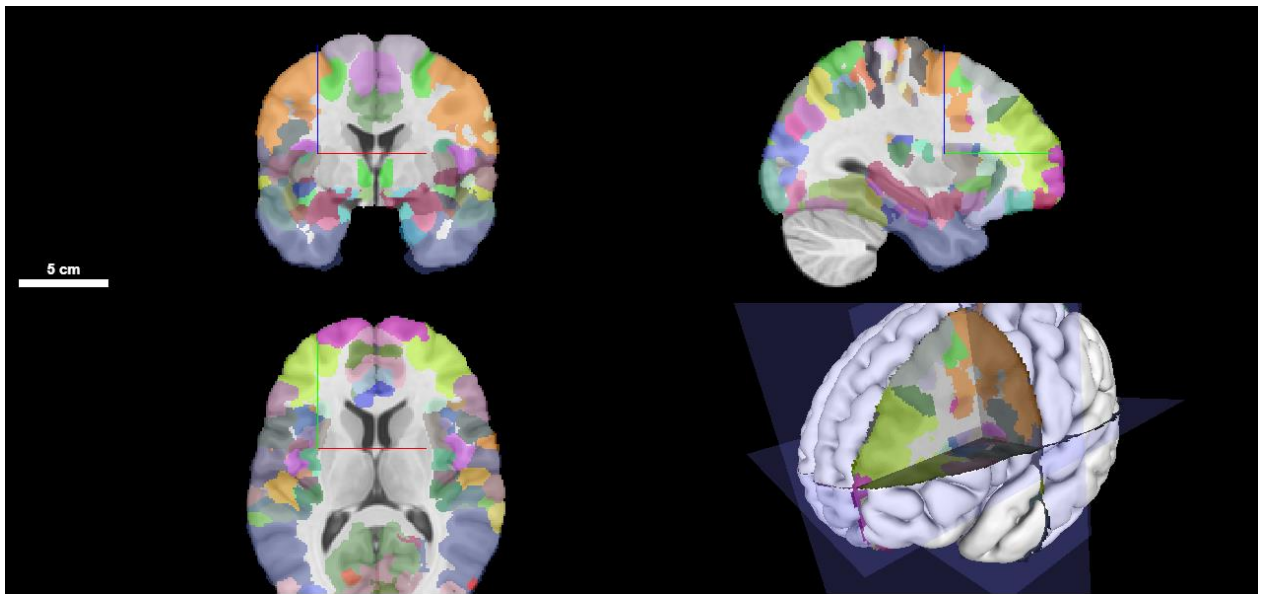
Existe la hipótesis de que la corteza cerebral está organizada en columnas, y que, a su vez, las columnas están organizadas en minicolumnas que son agrupaciones de neuronas. (Arteaga D. & Pimienta J., 2004)

Explicando cada estructura citada, encontramos que las columnas son grupos de células que procesan información de la misma fuente de estímulo y forman una estructura común. Las columnas están formadas por grupos de entre 50 y 80 conjuntos de minicolumnas que tienen un cierto número de propiedades fisiológicas comunes y que están unidas por conexiones horizontales. Adicionalmente, las minicolumnas están formadas por un gran número de neuronas, quienes son la estructura funcional básica que participa en este entramado.

## 2.2 Human Brain Project

El Human Brain Project (Proyecto del Cerebro Humano) es uno de los grandes proyectos de la Unión Europea que inició en 2013 con el objetivo de crear el framework necesario para reproducir las características del cerebro humano y gracias a ello, conseguir avances en el campo de la medicina y de la neurociencia. En él han trabajado a lo largo de estos años más de 500 científicos e ingenieros de más de 140 universidades, entre las que se encuentra la Universidad Rey Juan Carlos.

En el transcurso del proyecto, se han logrado diversos avances científicos, entre ellos, es destacable mencionar que han logrado proporcionar el atlas más detallado del cerebro humano hasta la fecha del siguiente estudio (Cumbre Final Del Proyecto Sobre El Cerebro Humano — Logros y Futuro de La Investigación Digital Sobre El Cerebro | Configurar El Futuro Digital de Europa, 2023) que ha contribuido en el conocimiento de los mecanismos neuronales de la visión y de la memoria, además de desarrollar un implante cerebral para ayudar a conseguir que personas ciegas puedan ver.



*Figura 2. Representación del atlas cerebral desarrollado por el grupo de trabajo Human Brain Project.*

En la Figura 2 se puede observar el atlas del cerebro mencionado anteriormente, en él es posible visualizar el cerebro desde tres ángulos distintos y, además, se encuentra una imagen global del mismo. En las 4 representaciones se observa el uso de diferentes colores para mapear las distintas regiones del cerebro.

### 2.2.1 EBRAINS

En 2021, con el objetivo de agrupar y dar soporte a las distintas aplicaciones creadas en el proyecto HBP y con la finalidad de que las mismas perduraran en el tiempo

## Grado en Ingeniería Informática

y fueran una fuente de investigación en el futuro, se creó Ebrains (Appukuttan et al., 2023), que es una infraestructura de investigación que proporciona acceso a una amplia gama de recursos, entre los que se encuentran:

- **Conjuntos de datos cerebrales:** Es una base de datos abierta y gratuita donde se encuentran datos neurocientíficos, modelos computacionales y herramientas software.
- **Atlas del cerebro:** Aquí se encuentra la aplicación con el atlas del cerebro humano explicada anteriormente, asimismo, se encuentran datos procedentes del cerebro de otros animales como los monos, las ratas y los ratones.
- **Modelado, simulación y computación:** En este apartado, es posible utilizar diversas herramientas interactivas desde nivel celular hasta el cerebro completo. Entre ellas, se encuentra NeuroScheme, que será la aplicación sobre la que se trabajará en este Trabajo de Fin de Grado.
- **Herramientas y servicios para la validación multinivel de modelos:** Es el grupo de herramientas que proporciona EBRAINS para el análisis y validación de modelos a través de distintos conjuntos de datos.
- **Plataformas de investigación en salud:** Existen dos importantes herramientas en este ámbito. TEF-Health que tiene el objetivo de crear herramientas para personalizar tratamientos de enfermedades neurodegenerativas y eBrain-Health que intenta mediante datos cerebrales multimodales encontrar nuevos biomarcadores y objetivos terapéuticos.

Como he comentado anteriormente, el objetivo de este proyecto es desarrollar una representación esquemática de estructuras neuronales. Para ello, se modificará la aplicación NeuroScheme con las representaciones desarrolladas en la aplicación Hugo que añadirán nueva información de valor a las ya existentes. En las siguientes secciones se describen brevemente ambas aplicaciones.

### 2.2.2 NeuroScheme

NeuroScheme es un software de visualización que se basa en representaciones esquemáticas de los datos, estructurados en distintos niveles de abstracción. Entre estos niveles encontramos columnas, minicolumnas y neuronas. (Pastor et al., 2015)

# Grado en Ingeniería Informática

La aplicación a su vez funciona mediante dominios, actualmente existen dos: congen y cortex.

El dominio congen está orientado a la visualización de la conectividad neuronal. Además de proporcionar visualizaciones de los datos, incorpora la capacidad de edición, de manera que se puede usar para definir las propiedades tanto de las conexiones como de las células. Además de crear circuitos complejos. Existe una gran facilidad para mover los grupos de población entre distintos niveles de abstracción, debido a ello, se pueden crear redes muy complejas con cierta facilidad.

El dominio cortex, por su parte, está creado para analizar estructuras de la corteza cerebral, como se ha mencionado anteriormente, en él se encuentran la representación simbólica de neuronas, columnas y minicolumnas ya explicadas. El objetivo del proyecto será agregar sobre este dominio una nueva representación complementaria para así añadir a la visualización existente información añadida, debido a ello, es necesario explicar las representaciones neuronales ya existentes en la aplicación NeuroScheme.

Dentro de NeuroScheme existen distintas representaciones simbólicas asociadas a cada nivel de abstracción. Estas visualizaciones resaltan las propiedades más relevantes y ocultan los detalles menos importantes para cada nivel.

El presente trabajo se centra en la implementación de representaciones en el dominio cortex, debido a ello es esencial conocer las distintas representaciones que este contiene.

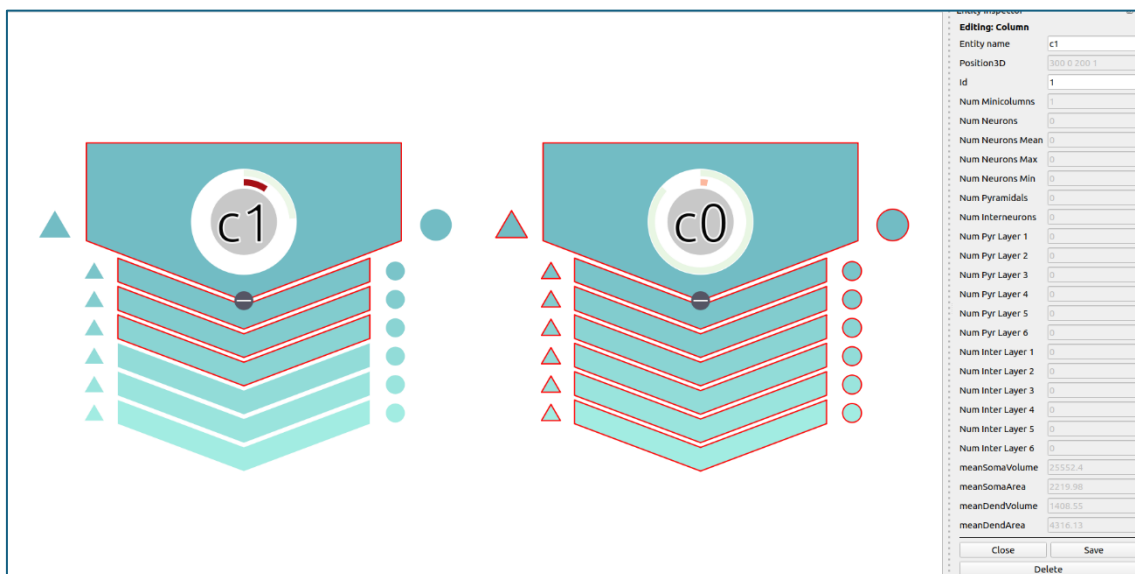


Figura 3. Representación de columnas en NeuroScheme



## Grado en Ingeniería Informática

En la Figura 3, se puede observar la forma en la que NeuroScheme representa las columnas, en esta imagen, es posible observar dos columnas, c1 y c0, además de ver el menú editable de una de ellas, la columna c1. Centrándonos en las columnas, se va a explicar los elementos que contienen. La columna se representa con una forma pentagonal, dentro de ella se encuentra como elemento más visible, un círculo con el nombre de la misma, además de dos arcos alrededor de él, con los que se representa de forma esquemática, propiedades relativas a los somas y las dendritas de las neuronas contenidas por dicha columna. Asimismo, debajo de la figura pentagonal existen 6 figuras hexagonales que muestran la representación por capas de las columnas. Se puede observar cómo ambas columnas no tienen seleccionadas el mismo nivel de detalle, la columna c1 no tiene seleccionadas todas las capas posibles, mientras que la columna c0 si las tiene. En el menú de edición nos encontramos con algunas de las características más importantes de las neuronas que componen esta columna, como pueden ser el área y el volumen medio de los somas o el volumen medio de las dendritas.

El siguiente nivel de abstracción existente en NeuroScheme son las minicolumnas, en el caso de la Figura 4 se pueden observar las que están contenidas en la columna c1, en este caso solo existe una, la minicolumna mc0.

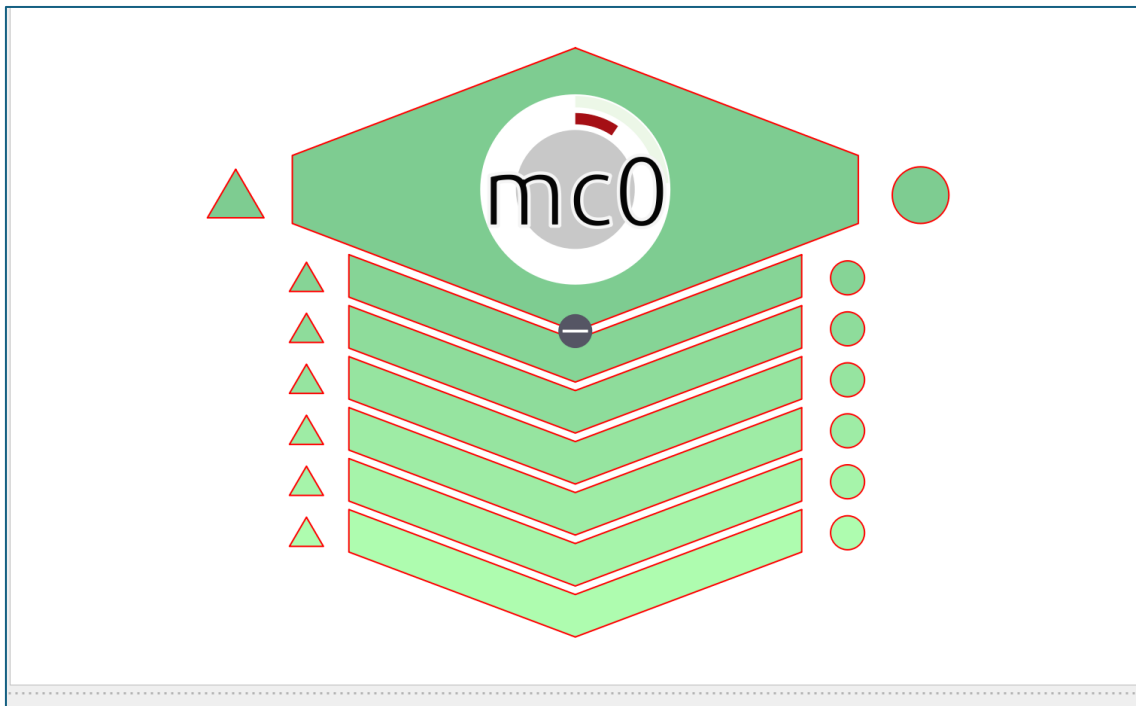


Figura 4. Representación de minicolumnas en NeuroScheme

Se puede percibir que tiene un formato muy similar a las columnas, las diferencias residen en la forma contenedora del círculo central, siendo en este caso una figura

## Grado en Ingeniería Informática

hexagonal frente a la figura pentagonal de las columnas y en el color de la representación, siendo esta de color verde. El resto de la estructura es muy similar, en el centro se encuentra un círculo con las mismas características que las citadas anteriormente y además cuenta con el mismo sistema de capas. En este caso, la columna solo tiene una minicolumna, puesto que es un esquema más sencillo a la hora de comprenderlo, pero cabe destacar que una la columna puede estar compuesta de un gran número de minicolumnas.

En el último nivel de abstracción con el que cuenta el dominio cortex se puede observar la información de las neuronas que forman la estructura de una minicolumna (Figura 5):

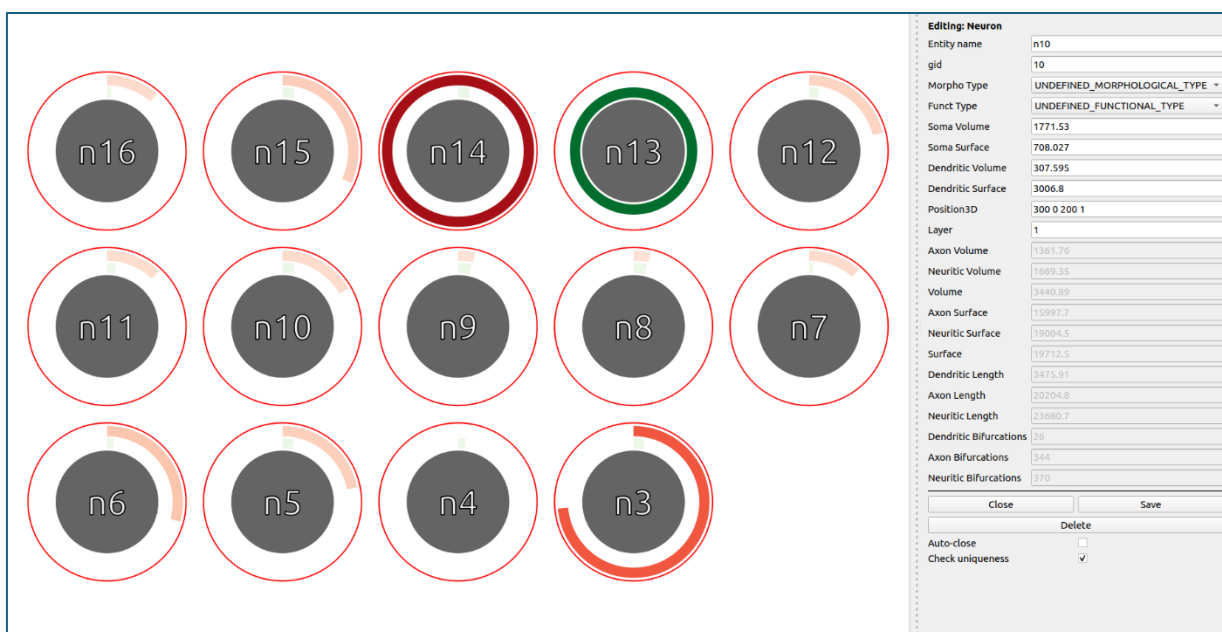


Figura 5. Representación de distintas neuronas en NeuroScheme

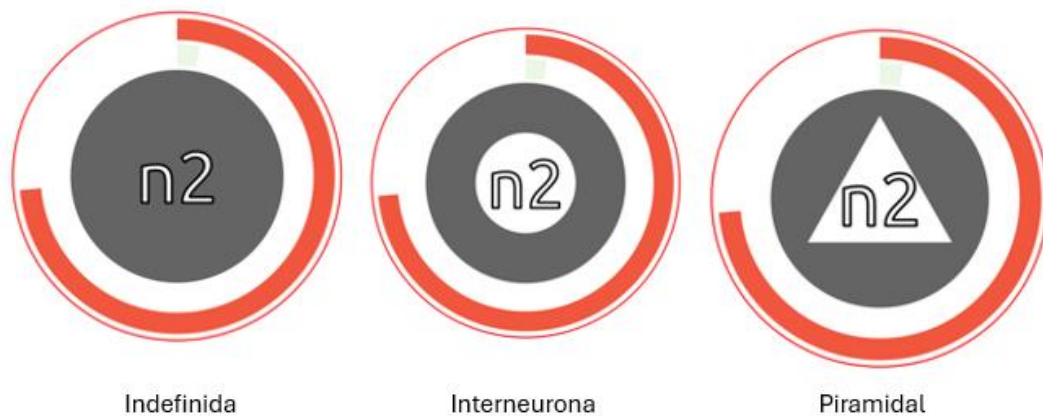
Se alcanza el nivel más bajo de abstracción, en este caso se pueden observar 14 neuronas que forman parte de la minicolumna, al igual que he mencionado anteriormente, una minicolumna puede estar formada por cientos de neuronas. En este caso, se observa que mantienen el formato de las anteriores representaciones, pero únicamente mostrando el círculo central. Al igual que en las estructuras anteriores, la semicircunferencia exterior representa el soma y la interior las dendritas. Sobre esta representación, se añadirá la representación dendrograma desarrollada en el software Hugo, para añadir a la visualización existente nueva información. La nueva representación añadida será complementaria a la actual y se podrá seleccionar si se quiere visualizar, por lo tanto, los

## Grado en Ingeniería Informática

neurocientíficos podrán mantener la representación actual, pero también tendrán la oportunidad de observar la nueva. En la imagen también se puede examinar la pantalla de ajustes donde se podrá ver y editar algunos de los parámetros más importantes de la neurona.

Asimismo, NeuroScheme cuenta con distintos métodos para visualizar y editar las neuronas, en cuanto a visualización, existen filtros de orden y diversas formas de colocar las neuronas en la pantalla, entre ellas, se encuentra el posicionamiento de forma circular o de forma libre. Adicionalmente, se puede editar la neurona, cambiando su morfología y su funcionalidad, además es posible editar el volumen de las dendritas y del soma.

Las neuronas cuentan con un código de colores y de símbolos, en cuanto a la morfología, si esta no está definida, se representará únicamente con un círculo relleno. Mientras que si es una interneurona contará con un círculo blanco dentro y si es una neurona piramidal se representará con un triángulo (Figura 6).



*Figura 6. Representación de neuronas en NeuroScheme con distintas morfologías*

Por otra parte, el círculo mencionado anteriormente, que se encuentra en el interior de la representación, puede ser de distintos colores dependiendo de la funcionalidad de la neurona, si no está definida será gris, si su funcionalidad es inhibitoria será rojo y si es excitatoria será azul. (Figura 7)

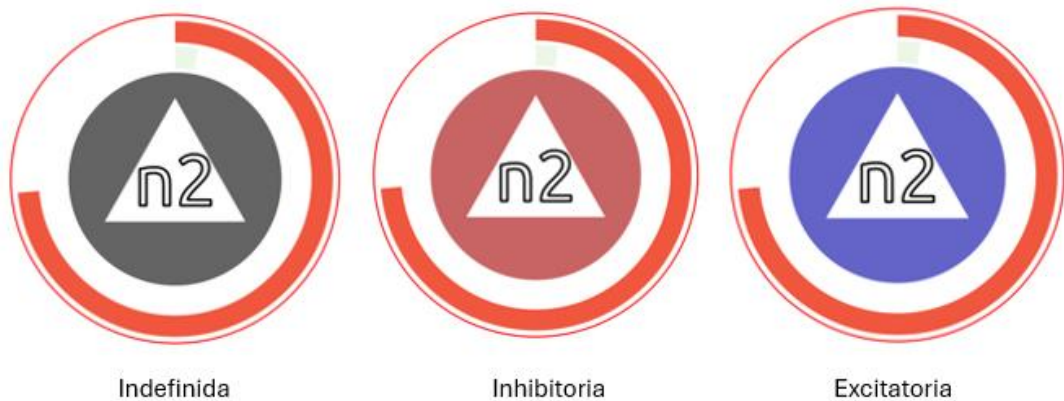
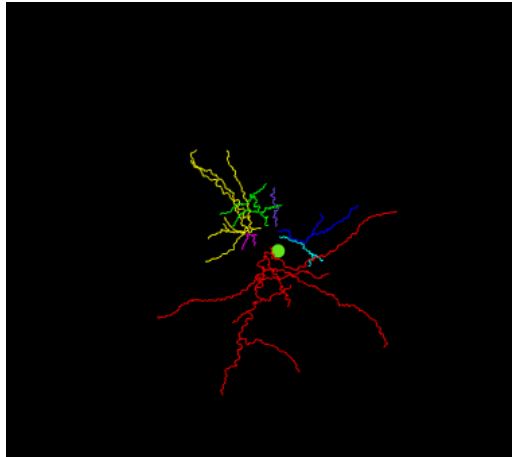


Figura 7. Representación de neuronas en NeuroScheme con distintas funcionalidades

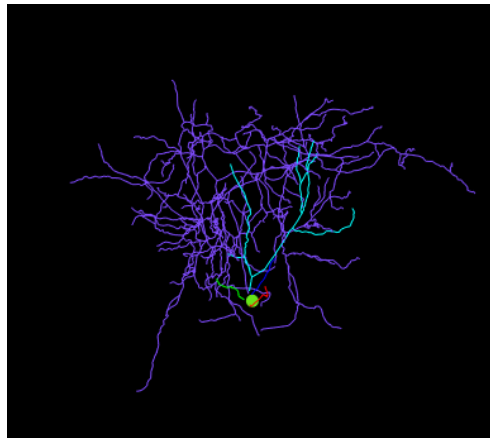
### 2.3 HUGO

Hugo (Aliaga Maraver et al., 2022) es un software de representación de neuronas desarrollado por el Dr. José Juan Aliaga Maraver, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en colaboración con otros estamentos como la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el objetivo de este software es conseguir una representación esquemática para hacer más comprensible las neuronas a la hora de visualizarlas. En este caso el software Hugo, se centra en representar visualmente los árboles dendríticos y los árboles axonales, permitiendo además representar otras variables adicionales. Gracias a ello, se pueden estudiar mejor los mismos, encontrar similitudes entre ellos y llegar a nuevos avances neurocientíficos.

La forma de las neuronas y sus particularidades están almacenadas en ficheros que siguen el formato SWC (su nombre codifica los apellidos de sus diseñadores: Ed Stockley, Howard Wheal y Robert Cannon)(Mehta et al., 2023) Estos ficheros contienen información de la morfología neuronal, almacenando los puntos que forman la estructura tridimensional de las neuronas y como se conectan entre ellas, además contienen un número identificador de la neurona. Gracias a estos ficheros se puede reconstruir las neuronas mediante distintos softwares informáticos y conseguir visualizaciones como en Figura 8 y Figura 9. Pero cabe destacar que entenderlas es una tarea compleja, y más, cuando usualmente se trabaja con volúmenes de datos muy elevados que cuentan con neuronas formadas por cientos de puntos.



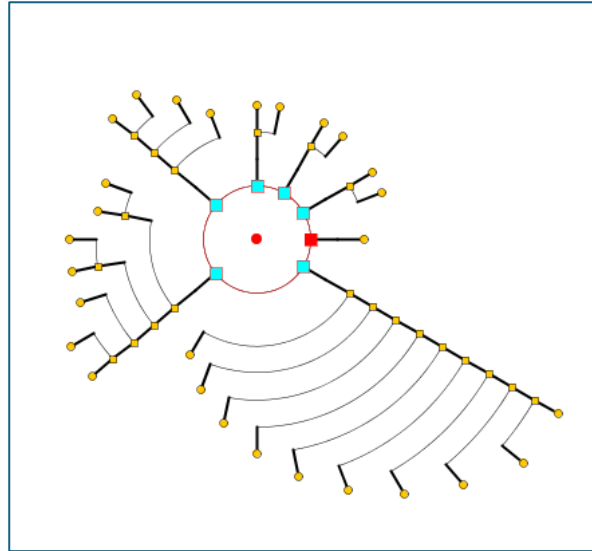
*Figura 8. Representación de una neurona tridimensional*



*Figura 9. Representación de una neurona tridimensional*

Partiendo de dichas premisas, surge HUGO, una aplicación que pretende solucionar dichos problemas creando una visualización esquemática de la estructura neuronal. El objetivo principal de la misma es pasar de una representación realista 3d donde los datos son complejos de comprender debido a la gran cantidad de información existente en los mismos, a una representación 2d donde se pretenden representar de forma esquemática la información de los árboles que componen las neuritas (Figura 10):

## Grado en Ingeniería Informática



*Figura 10. Dendrograma de una neurona en Hugo.*

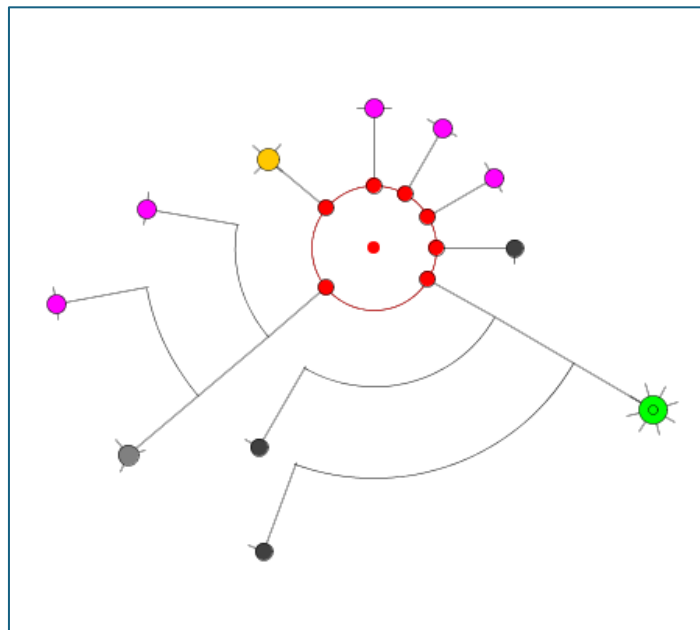
Hugo cuenta con diversas representaciones, entre las cuales destaca el dendrograma, el cual se basa en representar la estructura neuronal de forma esquemática, en el centro de la figura se puede observar el soma. Asimismo, existen distintas estructuras en forma de árbol que se van ramificando en los nodos internos hasta llegar a un nodo terminal. Dichas estructuras, son las diversas neuritas que forman la estructura neuronal.

En la Figura 10, el soma se representa mediante un punto rojo que se encuentra en el interior de un círculo. Desde dicho círculo nacen el axón, ramificación que inicia con un cuadrado rojo y las dendritas que son ramificaciones que inician con un cuadrado azul. Los nodos internos de las neuritas están representados mediante rombos amarillos y los nodos terminales mediante círculos del mismo color. En esta representación, se logra visualizar las neuronas sin perder la información correspondiente con la estructura de las neuritas y sus distintas ramificaciones, ya que es posible identificar todas las estructuras importantes, y además se logra que esta sea intuitiva y cómoda para la vista, ya que es posible observar los nodos terminales de las neuritas entre las distintas características. No obstante, esta representación no logra mantener toda la información correspondiente a la neurona ya que al ser esquemática y en dos dimensiones se pierden datos como el tamaño real de las neuritas y su forma tridimensional.

La representación diseñada en este software es parametrizable con distintas variables morfológicas y entre sus diversas opciones destacan, la posibilidad de elegir el tamaño de los segmentos según las características seleccionadas, como el tamaño o el volumen de este el volumen. También es posible editar el grosor según las características seleccionadas.

## Grado en Ingeniería Informática

Por otra parte, también existe una representación con las mismas características que la explicada anteriormente, pero con un grado de abstracción aún mayor. Se trata de la representación por niveles. Es sobre todo útil en caso de neuronas grandes con un gran número de bifurcaciones, puesto que la visualización de estas puede ser costosa al contar con tantas ramificaciones. Por lo tanto, esta representación (Figura 11) no representa todos los nodos terminales si no que llega a un determinado nivel, podando y ocultando las ramificaciones de niveles inferiores. La información eliminada por dicha poda se representará dónde mediante un círculo que cuenta con distintos segmentos que ilustran la cantidad de nodos podados. Para dar un ejemplo, se observa como los nodos acabados en un símbolo rosa tienen aún dos nodos terminales ya que el círculo está acompañado de dos líneas, el nodo amarillo por su parte oculta 4 nodos terminales y el nodo verde, que es el más complejo tiene 18, ya que el círculo interior representado dentro del círculo exterior simboliza que existen 10 nodos terminales podados adicionales a los 8 segmentos que le acompañan.



*Figura 11. Representación por niveles de una neurona en Hugo*

Una vez explicado y comprendido el estado en el que se encuentra Hugo, es momento de embarcarse en el desarrollo de este nuevo software.





## 3. Desarrollo

Partiendo de los objetivos mencionados anteriormente en el capítulo uno, el desarrollo informático que se realizará en este proyecto tiene dos grandes secciones claramente diferenciadas. El desarrollo de una aplicación inicial independiente, en la cual se implementarán los distintos algoritmos necesarios para crear las distintas representaciones, y la aplicación final integrada en el entorno de NeuroScheme, donde se obtendrán los resultados buscados.

Con el objetivo de implementar las distintas visualizaciones, se trabajará en el entorno Linux y, además de usar el lenguaje de programación C++, se usará Qt y OpenGL para implementar las representaciones y poder así interactuar con ellas, mediante rotaciones, traslaciones y escalados.

### 3.1 Aplicación inicial independiente

Como he comentado anteriormente, en el apartado 1.4 (Recursos) la aplicación final se desarrollará bajo el marco del Human Brain Project, pudiendo usar las distintas librerías que este contiene. Entre ellas, se encuentra nsol, una librería que contiene las clases y métodos necesarios para procesar y conseguir información de una neurona contenida en un fichero SWC. Pero para iniciar este desarrollo, se ha tomado la decisión de que la mejor opción para crear las estructuras básicas es desarrollar las primeras representaciones sin hacer uso de estas librerías. Esta decisión se fundamenta en que el objetivo de esta primera fase será, además de desarrollar una primera imagen, mejorar el conocimiento en el lenguaje de programación C++ y aprender a utilizar las herramientas de visualización Qt y OpenGL, por lo tanto, para una mejor comprensión de estas herramientas se tomó dicha decisión.

En los siguientes apartados se explicarán las representaciones creadas en la aplicación intermedia y las bibliotecas utilizadas para ello.

#### 3.1.1 Representación básica

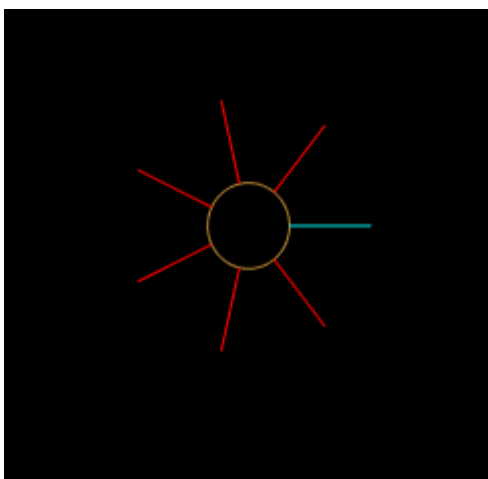
El objetivo inicial es crear una representación esquemática, en la cual, sea posible diferenciar entre el soma, las dendritas y el axón, que son las estructuras principales a mostrar.

Para ello, se crearán ciertas neuronas que consten de soma, axón y dendritas y se diseñará una primera visualización con estas características, en la cual el soma se

## Grado en Ingeniería Informática

encontrará en el centro y de él saldrán las distintas componentes mencionadas anteriormente.

Como se puede observar en la imagen (Figura 12), se muestra la representación inicial, que únicamente aporta información sobre el número de dendritas y la existencia de axón. En ella se consigue diferenciar entre soma, que es el círculo naranja, axón, que es la línea azul y dendritas que son las líneas rojas.



*Figura 12. Representación básica de una neurona en la aplicación intermedia*

Esta será la base para construir las representaciones futuras ya que, junto con la representación, se ha desarrollado un sistema de clases modular y jerárquico sobre el cual se basarán los desarrollos futuros, entre ellas, se cuenta con las clases más importantes, que son la clase neurona, soma, neurita, axón y dendrita. La clase neurita es una clase padre que engloba la mayoría de los métodos de axón y dendrita debido a que, a la hora de representarse de forma esquemática, ambas estructuras de la neurona se comportan de una manera similar.

### 3.1.2 Integración de biblioteca nsol

El siguiente paso para continuar con el desarrollo, es cargar neuronas mediante ficheros SWC ya que estos contienen la información de cómo se describen las neuronas mediante trazados morfológicos, esta información se extrae en los laboratorios neurocientíficos. Estos ficheros, contienen las distintas estructuras que presenta una neurona, y, además, los distintos puntos para representarla en un modelo tridimensional. Para ello, aprovechando el marco de trabajo en el que se encuentra el presente proyecto, se usará la biblioteca nsol desarrollada por el grupo de investigación VgLab citado anteriormente, dicha biblioteca es muy potente a la hora de realizar la carga, cuenta con diferentes métodos para obtener las distintas estructuras y secciones que las

componen.(*Nsol: Documentation, 2015*) Las secciones son las distintas ramificaciones que contienen las neuritas, es decir, tanto los axones como las dendritas. Como se puede observar en la Figura 13 (imagen sacada de la aplicación Hugo), una dendrita no es una línea recta, si no que la misma se va ramificando hasta llegar a los nodos terminales, cada ramificación que observamos es una sección.

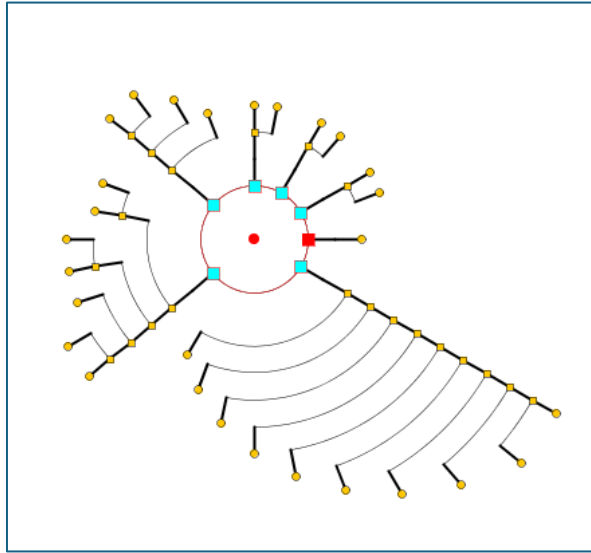


Figura 13. Representación dendrograma en el software Hugo

Una vez cargada la neurona y creadas las clases principales que se usarán a continuación, se continuará con el desarrollo siguiendo dos líneas diferenciadas de representación, la primera de ellas contará con la representación esquemática en 2 dimensiones, mientras que la segunda, representará la neurona en 3 dimensiones.

### 3.1.3 Representación tridimensional

La representación en 3 dimensiones consistirá en representar los puntos cargados del fichero swc, usando OpenGL. Para ello, se representará cada estructura de la neurona de diferente color para poder diferenciarlas. El trabajo consistirá en representar los distintos puntos que contiene el fichero y unirlos para conseguir la visualización (Figura 14). En esta imagen, es posible observar un punto verde grande en el centro (soma) y las diferentes neuritas representadas de distintos colores.

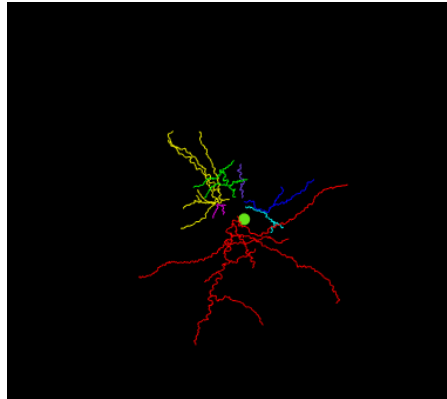


Figura 14. Representación tridimensional de neurona

Asimismo, para mejorar esta visualización y poder interactuar con ella, se ha añadido la posibilidad de rotar, trasladar y escalar la imagen usando para ello los distintos métodos proporcionados por OpenGL, gracias a ello, se obtendrá una mejor experiencia de usuario.

### 3.1.4 Representación bidimensional árbol

Para este paso, se retomará la representación creada anteriormente (Figura 12) y se tratará de seguir evolucionándola con la intención de obtener la representación desarrollada en el software Hugo. Cabe recordar que esta visualización, únicamente contaba con los elementos básicos como son el soma, las dendritas y el axón, el objetivo principal de este paso es mejorar la representación de estos elementos añadiendo las secciones usando la biblioteca de nsol mencionada anteriormente. Inicialmente, se desarrollarán las neuritas en forma de árbol. (Figura 15).

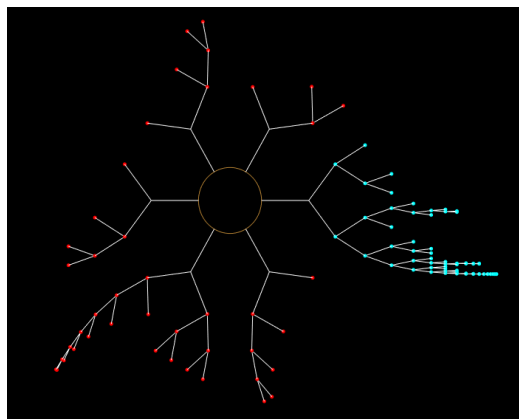


Figura 15. Representación árbol de neurona

## Grado en Ingeniería Informática

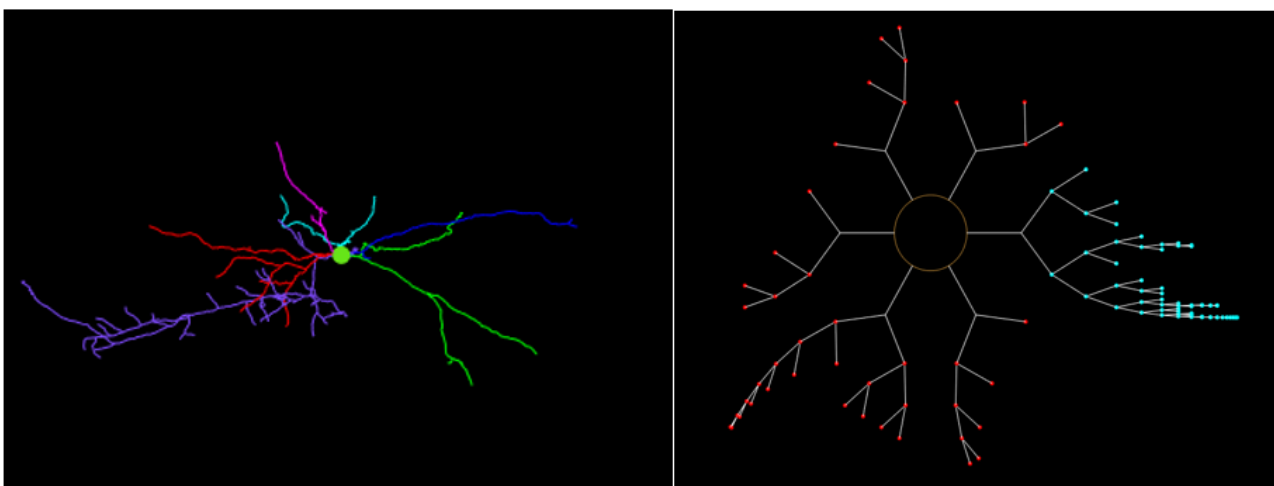
En cuanto al desarrollo de la representación es imprescindible tener en cuenta los ángulos y la distancia existente entre las distintas neuritas, esto es esencial, porque si no se tuvieran en cuenta estos parámetros, los distintos puntos se superpondrían, en caso de neuronas pequeñas no tendría una gran influencia, pero si lo sería en el caso de neuronas con gran tamaño.

Con este formato, partiendo desde el soma, las neuritas contendrán la información de los árboles dendríticos y los nodos terminales de las mismas.

Gracias a esta nueva representación, se puede contemplar las distintas secciones que contiene cada neurita, y lo que es más importante, los nodos terminales que contienen, ya que serán los que, en caso de los axones, envíen la información a otras neuronas, y en caso de las dendritas quienes reciban la información que será procesada por la neurona.

Asimismo, es un paso importante porque con ella, aparte de obtener una representación útil para nuestro visualizador, se consigue un avance importante para el objetivo final, la representación dendrograma.

Para poner en contexto la importancia de lo obtenido, en la Figura 16, se puede observar un ejemplo de esta representación acompañado de su representación homóloga en formato tridimensional, gracias a ello existe la posibilidad de compararlas y sacar las primeras conclusiones. Es importante conocer que cada bifurcación en la representación de 2 dimensiones corresponde con una bifurcación en la representación homóloga.



Representación 3d

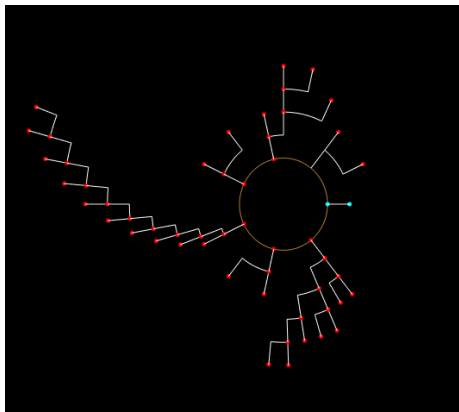
Representación 2d

*Figura 16. Representación 3d y 2d de la misma neurona en forma de árbol*

## 3.1.5 Representación bidimensional dendrograma

Continuando con el desarrollo informático, se alcanza el objetivo principal de esta aplicación intermedia, conseguir la visualización dendrograma, esta será un avance de la anterior representación. Cabe destacar que cuando se añaden nuevas representaciones en el visualizador no se eliminan las ya existentes, si no que se mantienen y se complementan con nuevas visualizaciones.

En la Figura 17, se encuentra un ejemplo de esta, para este desarrollo, como en el anterior, han jugado un papel muy importante los distintos ángulos y la cantidad de nodos terminales de cada región de la neurona. Puesto que, con un mínimo error en la representación, estos se solapan.



*Figura 17. Representación dendrograma*

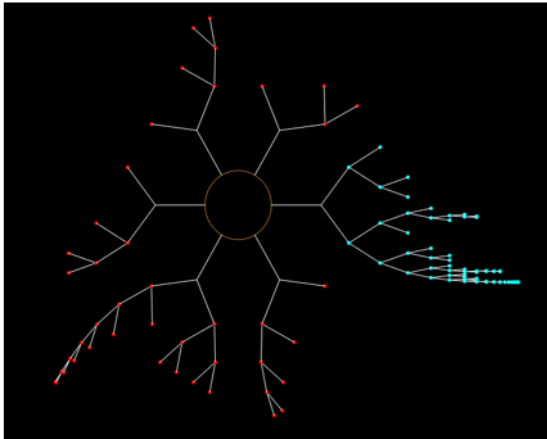
En el esquema de árbol las bifurcaciones se realizan siguiendo siempre el mismo formato, uno de los hijos toma una dirección mientras que el otro continúa por la otra. En el caso de la representación dendrograma, una de las secciones hijas continúa la línea recta después del punto de bifurcación, mientras que la otra, inicialmente continúa con una línea curva para no colisionar con la otra sección y posteriormente continúa con una línea recta hasta llegar al siguiente nodo de bifurcación o a un nodo terminal.

La visualización se consigue mediante un algoritmo recursivo, en el cual cada sección padre llama de forma recursiva a sus secciones hijas hasta encontrar un nodo terminal, que es el caso base. En cada paso recursivo se ha ido recalculando el ángulo y los puntos en los que se debe dibujar el inicio y el final de cada sección, además de contemplar la representación de los semicírculos que unen las secciones hermanas.

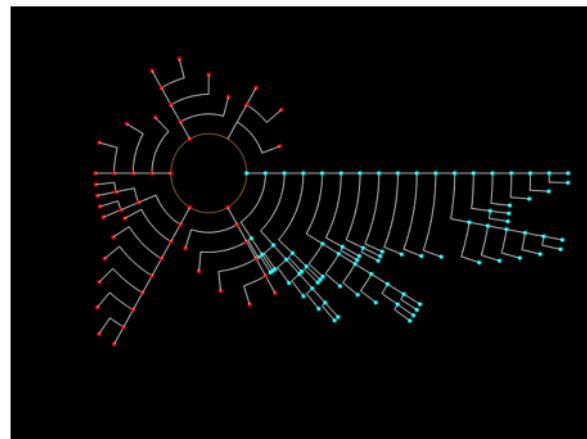
Como se puede observar en la siguiente comparación (Figura 18), esta representación tiene un formato similar a la anterior, ya que cada neurita contiene la

## Grado en Ingeniería Informática

división en secciones hasta llegar al nodo terminal, pero la forma de representarla cambia, manteniendo el mismo nivel de detalle, pero consiguiendo que sea más estética y aun si cabe más esquemática, gracias a esto se consigue que sea más comprensible para los humanos a la hora de estudiarlas y realizar investigaciones.



Representación árbol



Representación dendrograma

*Figura 18. Representación árbol y dendrograma de la misma neurona*

No obstante, aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, existe una mejor representación que ayudará a que a la hora de visualizarla, esta sea más estética, pero, sobre todo, que, a la hora de poder compararla con otras neuronas, todas ellas sigan el mismo formato. La biblioteca *nsol*, no diferencia entre los hijos de las secciones, es decir, una sección se bifurca en dos hijos, pero no diferencia cual continúa en cada camino.

Para poder mejorar esta representación, es esencial tomar una decisión respecto a ello. Por lo tanto, y al igual que se hace en el software *Hugo*, en los nodos de bifurcación explicados anteriormente, la línea que continuará por el mismo camino que mantenía la sección padre, será la sección que tenga un mayor número de nodos terminales. En la *Figura 19* se puede observar las diferencias entre ambas representaciones. Encontrando en el lado izquierdo la neurona antes de ser procesada y en el lado derecho la neurona una vez procesada.

Gracias a este cambio, se obtiene la representación dendrograma que posteriormente se añadirá en la aplicación *NeuroScheme*.

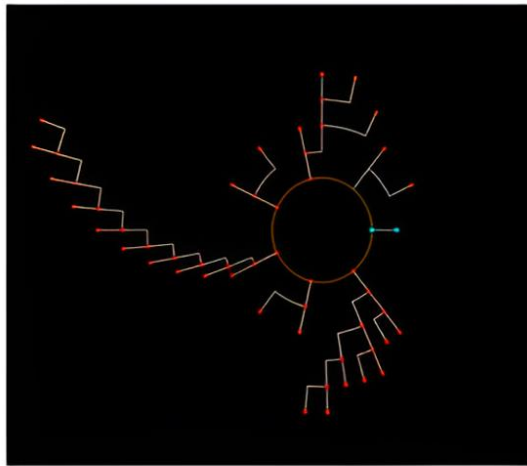


Imagen sin procesar

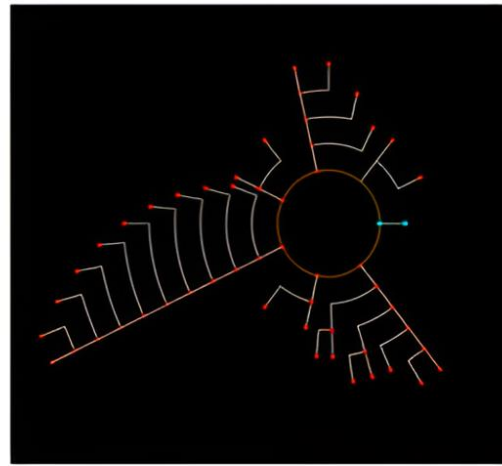


Imagen procesada

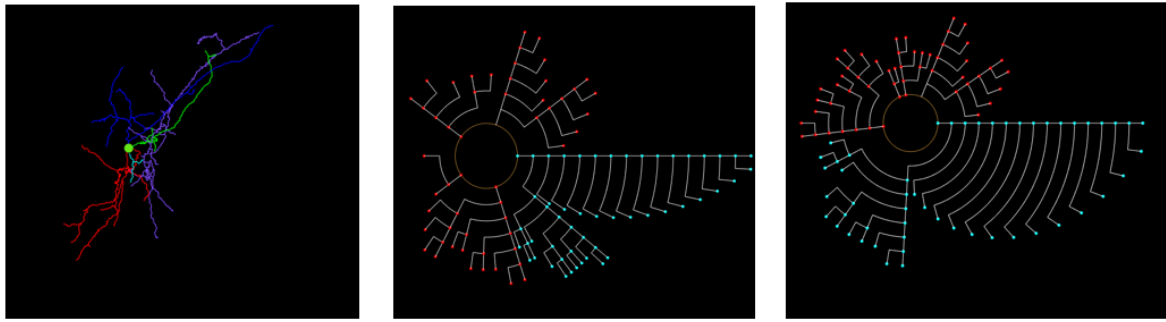
*Figura 19. Representación de una neurona en formato dendrograma antes y después de editar los nodos salientes de un punto de bifurcación*

### 3.1.6 Creación de variables

Una vez implementada la representación esquemática, es fundamental implementar una serie de variables morfológicas con las que se podrá parametrizar dicha representación. Dichas variables serán las mismas con las que cuenta el software Hugo. Con ellas, se dotará a la aplicación de un mayor grado de personalización ya que, por ejemplo, se podrá editar el grosor y el tamaño de las secciones o parametrizar el orden de visualización de las neuritas, y gracias a ello, se podrá obtener un mayor nivel de información.

En primer lugar, se añadirá la posibilidad de modificar el ángulo del que disponen las neuritas. Existirán dos modos, el primero de ellos, es el que hemos visto hasta ahora, todas las neuritas dispondrán del mismo ángulo para ser dibujadas. En cambio, en el segundo modo, el espacio que dispone cada neurita dependerá de la cantidad de nodos terminales que contenga. Esto ayudará a una visualización más limpia, ya que cuando todas disponen del mismo ángulo, algunas de las neuritas están muy juntas al contar con muchos nodos terminales, mientras que otras se encuentran solitarias. Se puede ver una comparación entre ambas en Figura 20.





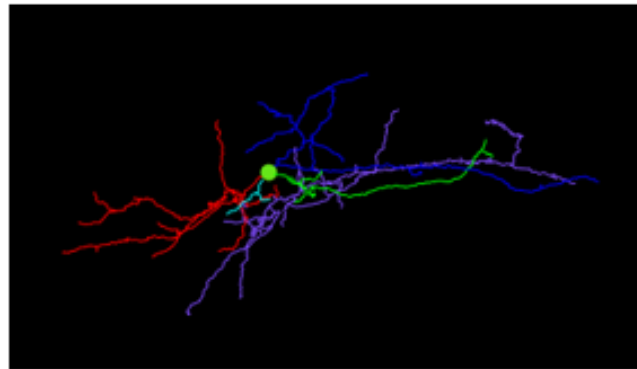
Representación 3d

Mismo ángulo

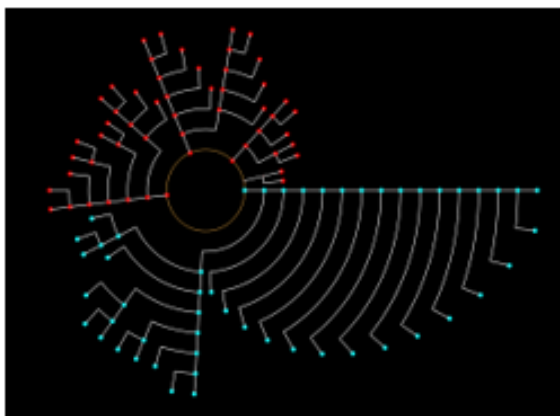
Diferente ángulo

*Figura 20. Comparación de representación según el ángulo de una misma neurona*

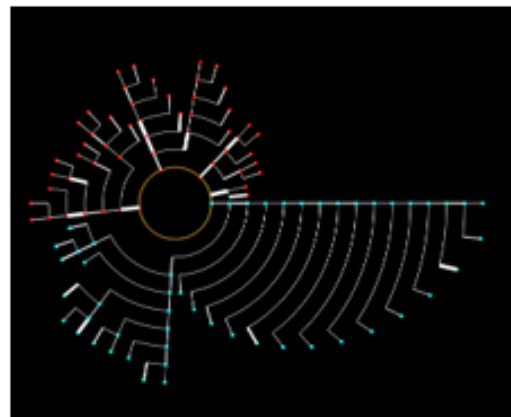
En segundo lugar, se podrá editar el grosor de las secciones, en este caso existirán distintos modos. Seguirá existiendo el grosor unitario, en este caso todas las secciones tendrán el mismo tamaño. También se podrá seleccionar el grosor de la sección en función del grosor real que tenga la misma, para ello, se calculará el volumen de la sección en función de sus puntos. Asimismo, se podrá seleccionar el grosor en función de la cantidad de nodos terminales que haya a partir de esa sección. Por otra parte, también será posible editarlo en función de la longitud de la sección real, calculada en función de los puntos que contiene. En la Figura 21, se puede observar las diferencias entre las distintas visualizaciones para una misma neurona.



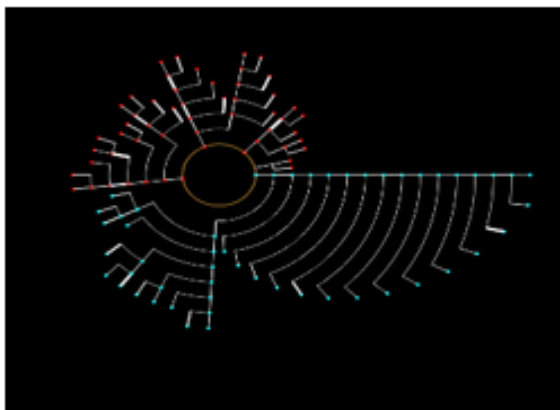
Neurona tridimensional



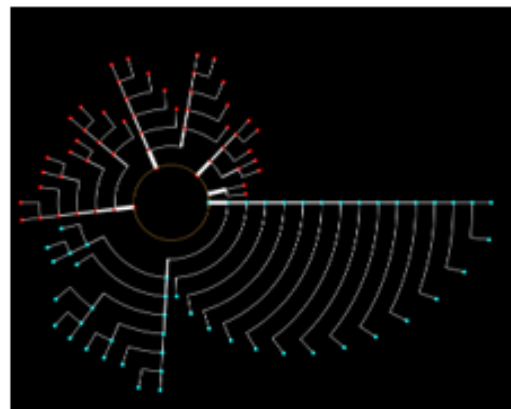
Unitaria



Grosor de la sección



Tamaño de la sección



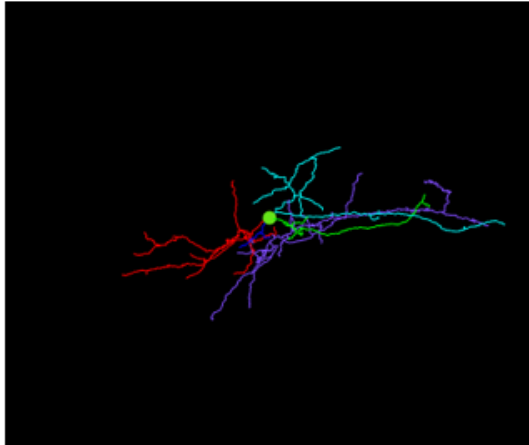
Nodos terminales

Figura 21. Comparación de la representación neuronal según el grosor de las secciones

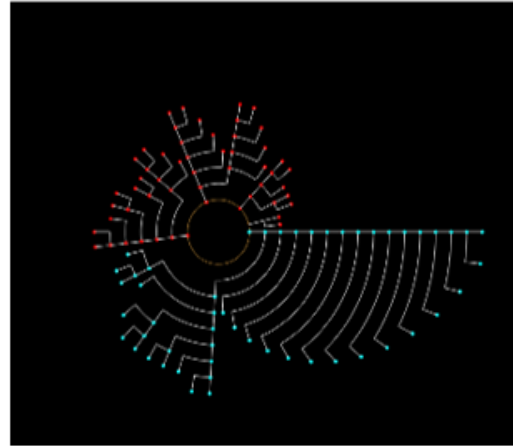
En tercer lugar, se puede editar la longitud de las secciones, cabe destacar, que los cálculos realizados para editar, por ejemplo, el grosor de las secciones, podrán ser usados también para editar la longitud de las mismas, por ello, la longitud de las secciones contará con un modo, en el cual se dibujarán en función de la longitud de la sección real. Asimismo, se contará con el modo unitario, en el cual todas las secciones medirán lo mismo. Por último, se contará con un último modo, en el cual se representarán las

## Grado en Ingeniería Informática

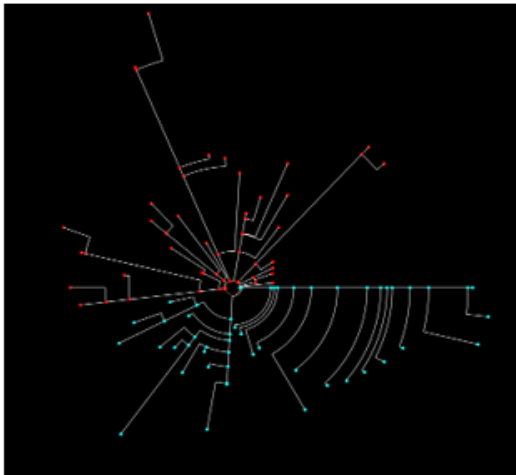
secciones con la distancia desde el punto final de la misma hasta el centro del soma. Este último modo, nos ayudará a crear una representación que se explicará más adelante. (Figura 22)



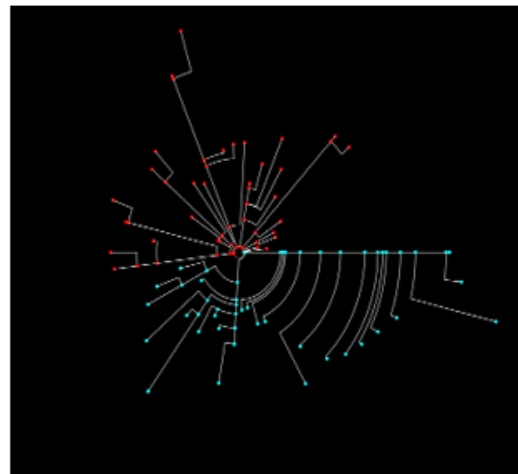
Representación 3d



Unitario



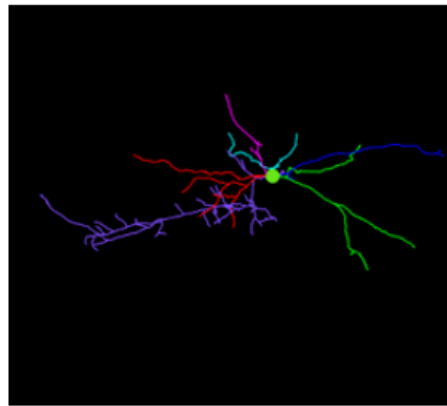
Tamaño longitud de la sección



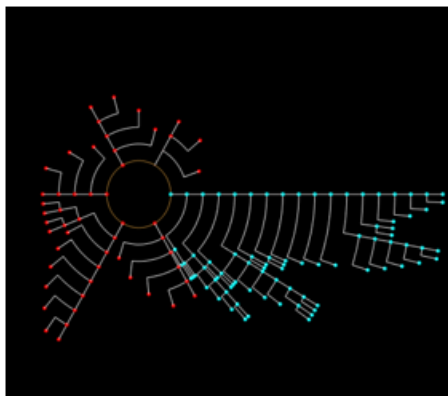
Tamaño centro soma hasta punto sección

Figura 22. Comparación de la representación neuronal según el tamaño de las secciones

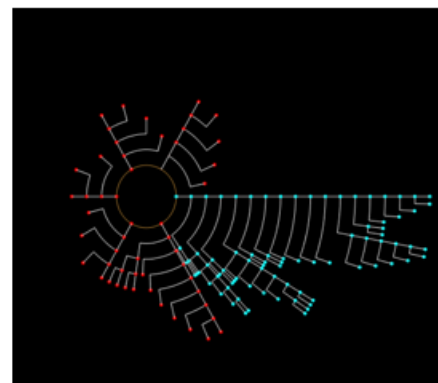
Por último, existe la posibilidad de modificar el orden en el que se dibujan las neuritas. Empezando desde los 0 grados y siguiendo el sentido de las agujas del reloj como sigue la representación, se podrá usar la representación por defecto, es decir, según como venga especificado en el fichero SWC. Adicionalmente y al igual que en las funciones anteriores se podrán ordenar por el número de nodos terminales, el grosor o el tamaño de las neuritas. No obstante, en los casos anteriores estas variables se calculaban sobre secciones en específico, en este caso, se calcularán sobre el total de la sección puesto que el orden influye sobre la estructura completa de la neurita.



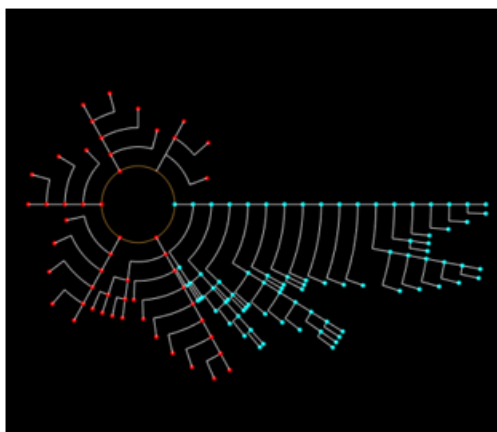
Representación tridimensional



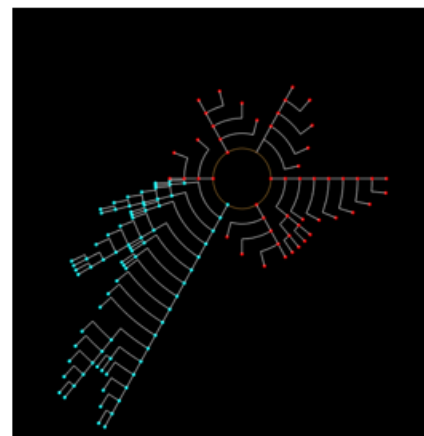
Por defecto



Longitud



Nodos terminales



Volumen

*Figura 23 Comparación de la representación neuronal según el orden de las neuritas*

Concluyendo con este apartado, hay que destacar que las variables de representación son complementarias entre sí, por ello, el neurocientífico tiene múltiples opciones de visualizaciones al realizar sus estudios, pudiendo escoger la más adecuada para sus investigaciones.

## 3.1.7 Interconexión entre representaciones

La interconexión entre la representación tridimensional y bidimensional es un aspecto importante para destacar en este software intermedio. Ayudará a corroborar que las representaciones creadas son correctas y mejorará la visualización y la interacción dentro del software.

Como se ha mencionado en el índice anterior, se implementará una última representación, basada en el dendrograma, usando la configuración en la cual las secciones se dibujan en función de la distancia entre su punto más lejano y el centro del soma. Esta es una representación existente en el universo neurocientífico denominada SHOLL (Bird & Cuntz, 2019). Alrededor de la representación 3D se representarán esferas y alrededor de la representación 2D se dibujarán círculos, ambos estarán situados a la misma altura del centro de la representación, con ello, en primer lugar, se corroborará si las secciones se encuentran a la misma distancia del centro, y, en segundo lugar, se podrá comparar a que distancia se encuentran más nodos terminales, y sacar conclusiones en torno a ello. Para ello, se podrá sacar una gráfica, con el número de nodos terminales en función a la distancia. (Figura 24)

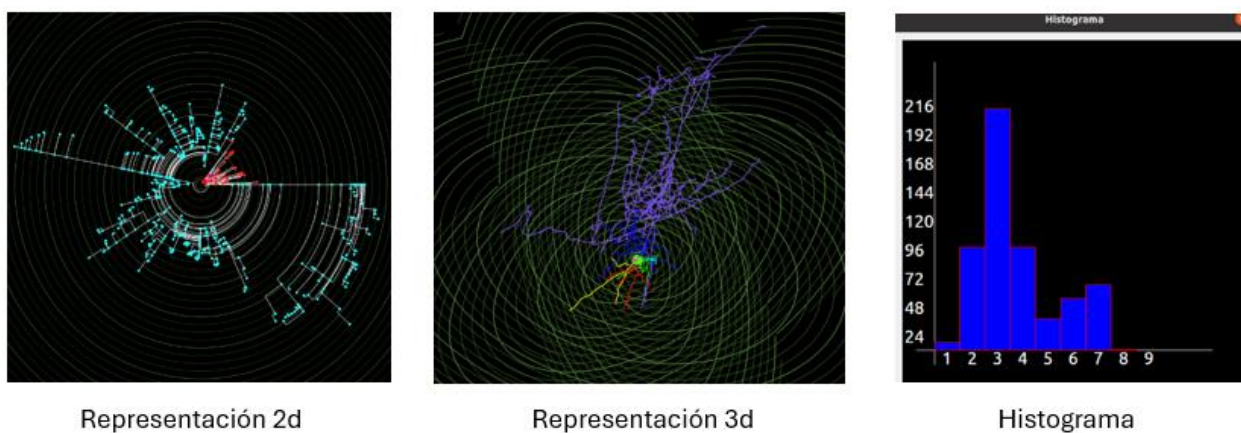


Figura 24. Representación SHOLL en NeuroScheme y su gráfica correspondiente

No obstante, la principal interconexión entre ambas vistas se fundamenta en la interacción con el ratón. Cuando se pasa el ratón por encima de los nodos de bifurcación de distintas secciones en la representación bidimensional, el mismo nodo se verá reflejado en la representación tridimensional con un punto rojo, asimismo, las secciones prolongadas por ese nodo también se marcarán en la representación tridimensional pintadas de blanco, como se observa en la siguiente Figura 25 y Figura 26.

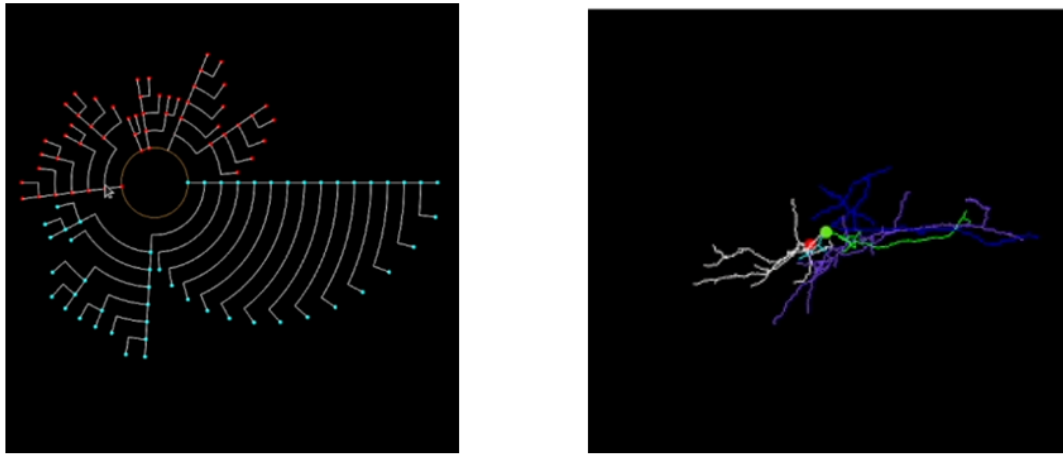


Figura 25. Representación 2d y 3d seleccionando un nodo de bifurcación y sus correspondientes secciones

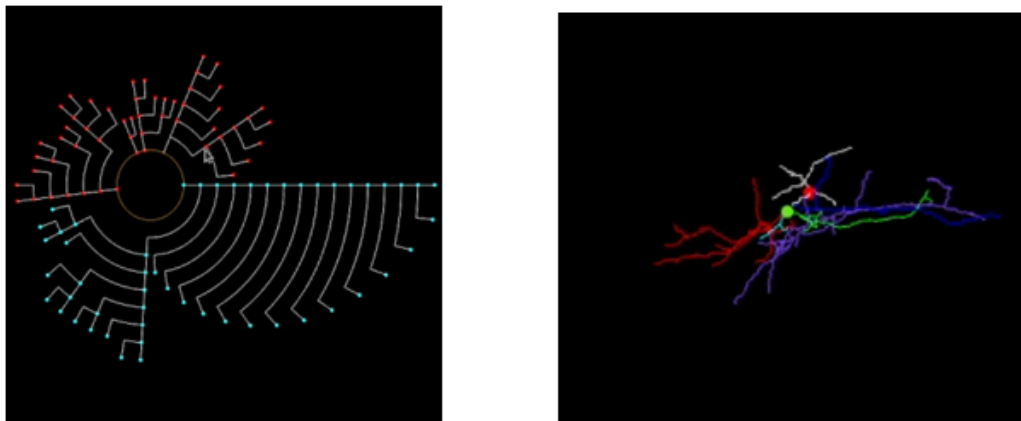


Figura 26. Representación 2d y 3d seleccionando un nodo de bifurcación y sus correspondientes secciones

Gracias a esta interacción, se puede corroborar que la creación del dendrograma se ha realizado correctamente puesto que cada sección en la representación bidimensional se corresponde con su homóloga en la tridimensional, asimismo, se dota de una mayor personalización e interacción para el usuario.

### 3.2 Análisis de NeuroScheme

Una vez alcanzados los objetivos principales en el desarrollo de la aplicación intermedia, que incluyen tanto los objetivos secundarios como el perfeccionamiento del manejo del lenguaje C++, el uso de Qt y OpenGL, y los objetivos primarios como la implementación y desarrollo de los algoritmos necesarios para crear diversas representaciones. Asimismo, durante esta etapa se logró la familiarización con diversas bibliotecas del grupo VgLab como es nsol.

## Grado en Ingeniería Informática

Para continuar con el desarrollo del presente trabajo y conseguir los objetivos propuestos, los siguientes pasos a seguir son la familiarización con el entorno de NeuroScheme y, por último, implementar el desarrollo de las representaciones en este software.

Realizando un análisis exhaustivo, viendo las propiedades y las limitaciones de NeuroScheme, se toma la decisión de no implementar todas las representaciones diseñadas en la aplicación intermedia, si no que se seleccionarán las más destacadas y que encajen mejor en este nuevo entorno.

La representación tridimensional, no será implementada en este software debido a que existen aplicaciones del grupo VgLab que ya realizan representaciones similares y que se pueden coordinar con NeuroScheme mediante paso de mensajes. Por lo tanto, el desarrollo en NeuroScheme se centrará en la representación bidimensional, concretamente en la visualización dendrograma.

La aplicación hace uso de distintas bibliotecas desarrolladas bajo el marco del proyecto HBP como nsol para la carga de ficheros y ZeroEQ que es la biblioteca utilizada para enviar mensajes entre los distintos softwares de este marco.

Por otra parte, la aplicación consta de dos dominios, cortex y congen, el desarrollo se centrará en el dominio cortex y debido a ello, el presente proyecto se centrará en desarrollar el código relacionado con dicho dominio.

### 3.3. Desarrollo en aplicación NeuroScheme

#### 3.3.1 Contextualización

El objetivo inicial de este apartado es implementar la representación dendrograma dentro de NeuroScheme. Una vez analizada la aplicación y encontrado el enfoque que tendrá, se comienza con el desarrollo.

La intención es implementar la posibilidad de añadir a la representación de neurona ya existente la representación creada en la aplicación intermedia, pudiendo el usuario escoger entre ver únicamente la antigua o visionarla con la nueva información añadida. La antigua visualización (Figura 27) representa de forma esquemática el soma y las dendritas, además de la forma de la neurona mediante la simbología explicada anteriormente.



Figura 27. Representación de 3 neuronas en NeuroScheme

Por ello, y aprovechando que la representación dendrograma no hace uso de la zona interior del soma, la intención será, usar el centro que proporciona NeuroScheme como soma, manteniendo la información que esta contiene, gracias a ello, se conseguirá ampliar la información representada visualmente.

### 3.3.2 Desarrollo dendrograma

El desarrollo inicialmente consistirá en analizar el código de NeuroScheme para encontrar el lugar donde mejor encajen los algoritmos diseñados en la aplicación intermedia y posteriormente implementarlos. El diseño algorítmico de las representaciones ya fue diseñado en dicho software, debido a ello, el objetivo será replicar el comportamiento de estos en el software final. Cabe destacar que, aunque los algoritmos ya hayan sido diseñados, las herramientas existentes no son las mismas puesto que en la aplicación intermedia se representaron ambas visualizaciones usando OpenGL mientras que en la aplicación final se usará únicamente Qt.

Una vez superadas las dificultades a la hora de comprender NeuroScheme y sus distintas librerías y de igual manera, el cambio de lenguaje al pasar de OpenGL a Qt debido a sus diversas particularidades se ha conseguido crear la representación (Figura 28).



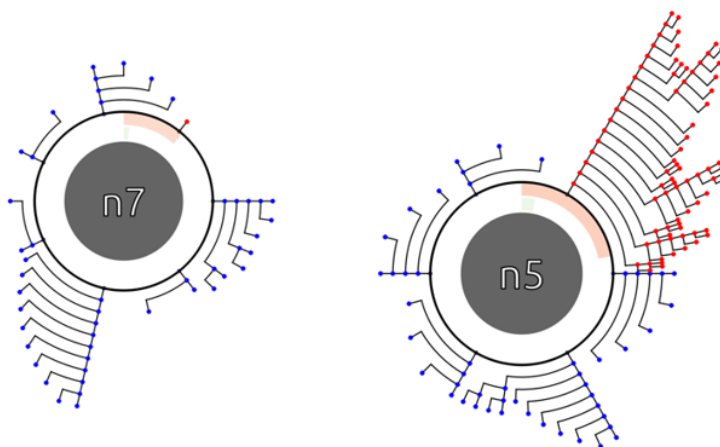


Figura 28. Representación dendrograma en el software NeuroScheme

Como se puede observar en la Figura 28, se ha logrado una representación muy similar a la que existía en la aplicación intermedia, pero con algunas particularidades. En primer lugar y como he comentado anteriormente, el soma gana protagonismo, ocupando un mayor espacio de la representación. Asimismo, también varía el color con el que representa puesto que, en la aplicación intermedia, el soma se representaba mediante un círculo de color naranja mientras que ahora se representa mediante un círculo negro.

Adicionalmente, es relevante destacar el cambio en el código de colores, las secciones se dibujarán en color negro, debido al cambio de color del fondo, ya que, en NeuroScheme este es blanco mientras que antes era de color negro. Asimismo, los axones se representarán de color rojo mientras que las dendritas serán dibujadas de color azul. Esto es debido a que, se considera el axón una región más importante a la hora de la visualización y, por lo tanto, se escoge un color que es más fácil de diferenciar a simple vista. Esto es importante ya que, en la aplicación intermedia únicamente se representaba una neurona, en cambio, en esta aplicación se podrán representar cientos de neuronas en una misma pantalla, teniendo que seleccionar los detalles más importantes y que son esenciales para las futuras investigaciones de los neurocientíficos.

### 3.3.3 Configuración de variables

Una vez añadida la representación inicial, se han añadido también las distintas variables morfológicas para poder modificarla. Inicialmente, se pretendía añadir todas las que existían en la aplicación intermedia, pero debido a las limitaciones y la carencia de sentido al no contar con una representación 3D en NeuroScheme, se ha decidido eliminar

## Grado en Ingeniería Informática

una de ellas, la variable morfológica que modificaba la longitud de la sección en función a la distancia comprendida entre el centro del soma y el punto final de la sección real, puesto que estaba fuertemente relacionada con la representación SHOLL, que al no existir la representación tridimensional en NeuroScheme ha sido imposible de recrear. Por lo tanto, las secciones únicamente podrán ser unitarias o variar en función del tamaño real de la misma, no obstante, este se ha normalizado para una mejor ocupación del espacio ya que este es reducido.

El resto de las variables morfológicas existentes en la representación creada en la aplicación intermedia se mantendrán. No obstante, cabe resaltar una limitación que existe al usar Qt, ya que el grosor de las neuritas usando OpenGL puede editarse usando números decimales, mientras que en Qt no existe tanta flexibilidad y solo se pueden usar números enteros y usando un grosor mayor de 2 hace que la representación empeore ya que las secciones se solaparían entre ellas. Por lo tanto, solo existirán 2 valores para el grosor de las neuronas, el valor 1 para las más pequeñas según la variable morfológica seleccionada, ya sea el tamaño, el grosor o la cantidad de nodos terminales y 2 para las de mayor tamaño.

En las siguientes figuras (Figura 29, Figura 30, Figura 31), podemos observar una serie de ejemplos de la misma neurona usando distintas variables.

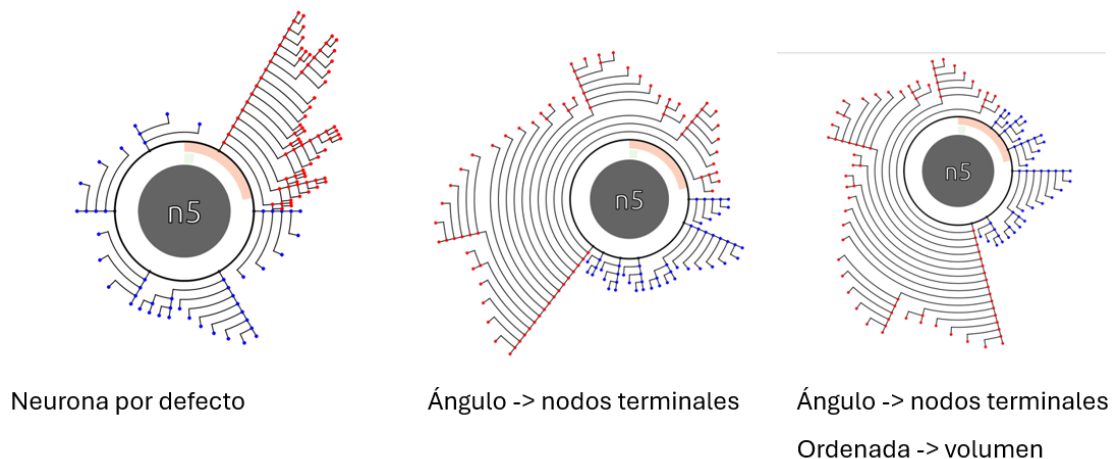
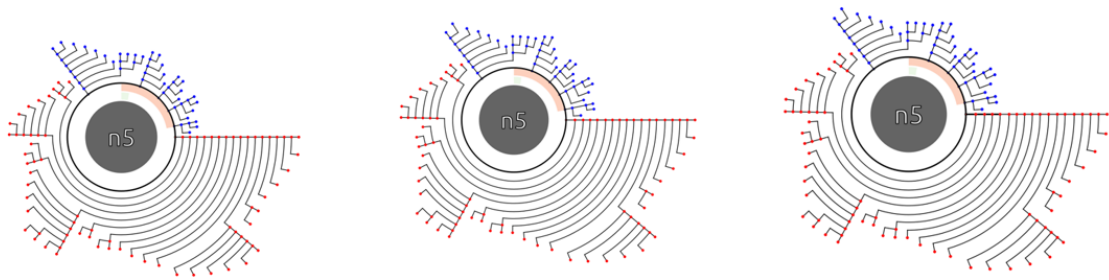


Figura 29. Representación de la misma neurona en NeuroScheme cambiando ciertos parámetros

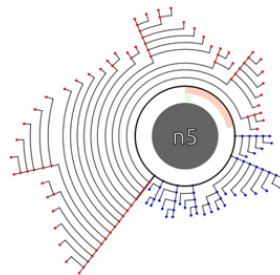


Ángulo -> Nodos terminales  
Ordenada -> Nodos terminales

Ángulo -> Nodos terminales  
Ordenada -> Nodos terminales  
Tamaño -> Tamaño real

Ángulo -> Nodos terminales  
Ordenada -> Nodos terminales  
Tamaño -> Tamaño real  
Grosor -> Nodos terminales

Figura 30 Representación de la misma neurona en NeuroScheme cambiando ciertos parámetros



Ángulos -> Nodos terminales  
Ordenada -> Tamaño neurita  
Tamaño -> Tamaño real  
Grosor -> Nodos terminales

Figura 31 Representación de la misma neurona en NeuroScheme cambiando ciertos parámetros

### 3.3.4 Visualización por capas

Una vez alcanzados los objetivos que se propusieron una vez finalizada la aplicación intermedia, se abre una nueva línea de mejora. El objetivo será poder reducir la representación dendrograma a una visualización más acotada, pero sin perder información. Para ello, se diseñará e implementará la visualización por capas presente en el software Hugo. El usuario podrá decidir el número de capas al que quiere llegar, es decir, podrá hacer una poda de la representación cortando en los distintos árboles formados por las neuritas al nivel que se dese.

Para ello, es necesario rediseñar todos los algoritmos de cálculo, puesto que antes los nodos terminales se consideraban como tal únicamente cuando la sección no tenía más hijos, pero ahora, para mantener la representación equilibrada, adicionalmente a

## Grado en Ingeniería Informática

considerar los nodos terminales que ya se consideraban anteriormente, se contarán los nodos que, sin ser terminales, estén al nivel de poda solicitado.

Si únicamente se hace la poda de ciertas ramas no se mantendrá la misma información que se podría obtener con la visualización completa. Para solventar dicho problema, inicialmente se decidió representar estos nodos terminales podados con diferentes figuras geométricas al igual que se hace en HUGO, usando el triángulo para los que aun tenían 3 nodos terminales, el pentágono en el caso de tener 5 etc.

Esta idea fue desechada ya que, aunque es cierto que para una única neurona funcionaba correctamente mostrando la información necesaria, al poner un gran número de estas en pantalla no se podían distinguir los distintos símbolos a simple vista.

Por lo tanto, se ha tomado la decisión de diseñar una representación basada en la ya existente, pero cambiando los detalles mencionados anteriormente con la intención de obtener una mejor representación y experiencia de usuario. Debido a ello, se escribirá en los nodos finales que no son terminales la cantidad de nodos podados que se encuentran ocultos. Para visualizarlo veremos en la siguiente Figura 32, la comparación de una neurona con distintos niveles de poda.

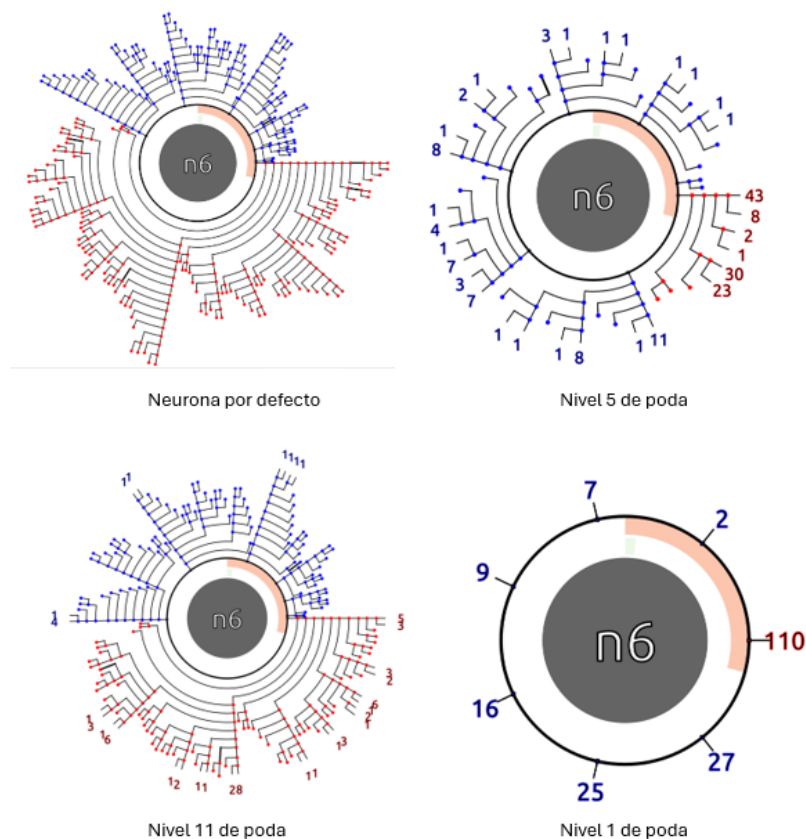


Figura 32. Representación de la misma neurona con distintos niveles de poda

## **Grado en Ingeniería Informática**

Como se puede observar, independientemente del nivel al que se encuentre la representación no se perderá la información de axones y dendritas, puesto que es conocido en todo momento el número de estas y la cantidad de nodos terminales que existen en ellas, partiendo desde la representación más simple, el nivel 1 de poda, al nivel más complejo, cuando no está podada.

Por otra parte, gracias al envío de mensajes entre las distintas aplicaciones dentro del marco de NeuroScheme existirá la posibilidad de obtener vistas coordinadas que representan la misma estructura neuronal que NeuroScheme pero utilizando una metodología distinta para representar los datos. Al estar conectadas las distintas aplicaciones, bastará con realizar una selección en una de las mismas para que todas se actualicen en consonancia. Con esto, se podrá visualizar la estructura neuronal seleccionada en el software NeuroScheme en otras aplicaciones como NeuroTessMesh que ofrece una representación realista.



## 4. Resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en el desarrollo informático del presente proyecto. En primer lugar, se evaluarán los resultados alcanzados en la aplicación intermedia. Posteriormente, se analizará la integración lograda con NeuroScheme y la incorporación de mejoras respecto a la aplicación inicial.

### 4.1 Aplicación intermedia

En la Figura 33 se observa una imagen del resultado final de la aplicación intermedia. La aplicación muestra en el recuadro principal la visualización seleccionada, siendo en este caso el dendrograma. Asimismo, arriba a la derecha se observa la representación tridimensional de la neurona. Debajo de ella se encuentran los distintos elementos que permitirán editar las neuronas, tanto su representación como sus variables morfológicas.

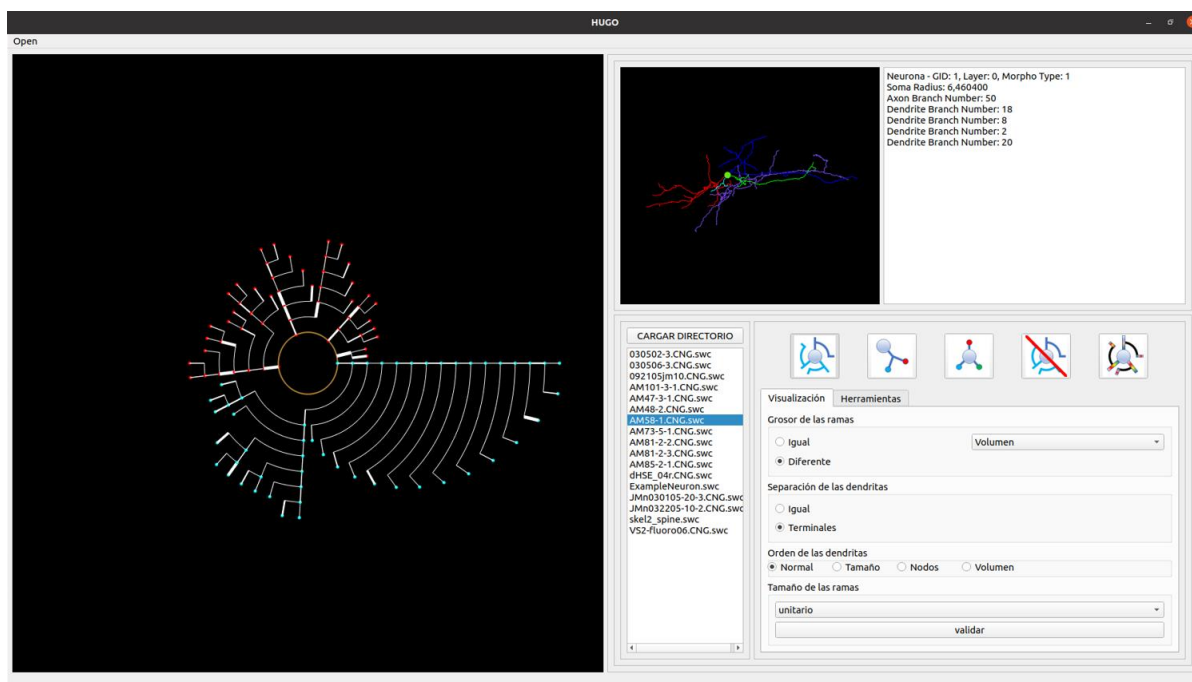


Figura 33. Aplicación Intermedia con la neurona AM58-1.CNG seleccionada

En primer lugar, se encuentran diferentes botones donde se puede escoger la representación a visualizar, pudiendo elegir entre dendrograma, árbol etc...

Debajo de dichos botones, se encuentran dos pestañas, en el caso de la imagen esta seleccionada *Visualización*, en esta pestaña es posible editar las diferentes variables morfológicas de las neuronas que se han ido creando a lo largo de la aplicación.

En el apartado de *Herramientas*, es posible sacar la gráfica de SHOLL(Figura 24) cuando esta seleccionada dicha visualización, además, se pueden reiniciar la aplicación y

eliminar las neuronas previamente cargadas. Por último, es posible guardar una imagen recortada de la neurona en el directorio que se escoja.

Adicionalmente, es posible cargar los directorios que contiene las estructuras neuronales mediante el botón cargar directorio y posteriormente seleccionar dentro de la aplicación la neurona a visualizar.

### 4.2 Integración en NeuroScheme e incorporación de mejoras

Este apartado se centrará en analizar los resultados obtenidos en la integración resultante al implementar en NeuroScheme las visualizaciones desarrolladas en la aplicación intermedia y la incorporación de mejoras en ellas.

Es destacable mencionar la excelente representación obtenida al combinar ambas visualizaciones debido a que la representación dendrograma no hacía uso de la parte central del soma, por lo tanto, añadir la información existente en la representación de NeuroScheme dentro del círculo hace que ambas visualizaciones mejoren puesto que ninguna pierde la información que representaba y además se consigue mostrar información añadida.

En la Figura 34 se observa la pantalla que se encontrará al visualizar 14 neuronas sin usar ninguna poda, es decir, el resultado de mostrar las neuronas completas obtenidas al integrar la aplicación intermedia en este marco de trabajo. Asimismo, en la Figura 35 se muestra el resultado de las mismas neuronas, pero esta vez podadas en nivel 6, este resultado se puede representar una vez incorporadas las mejoras de visualización dentro de la aplicación NeuroScheme.

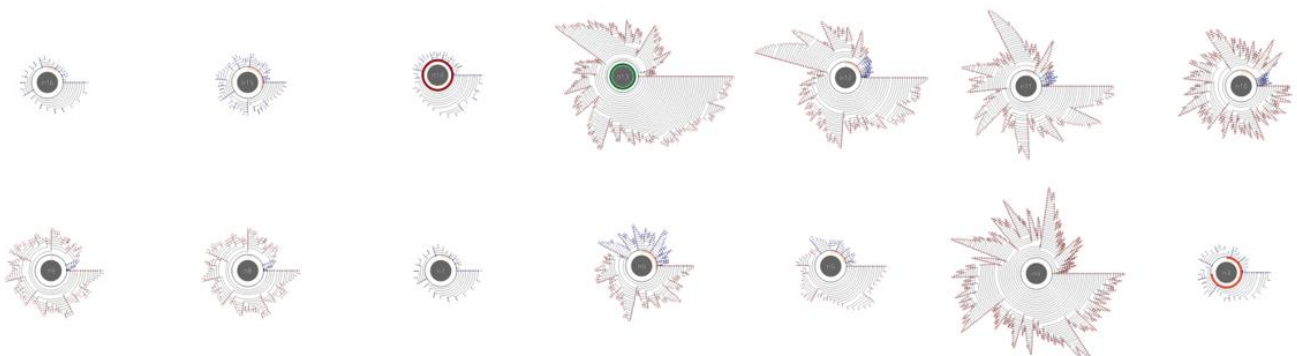


Figura 34. Neuronas de una minicolumna representadas en NeuroScheme



## Grado en Ingeniería Informática

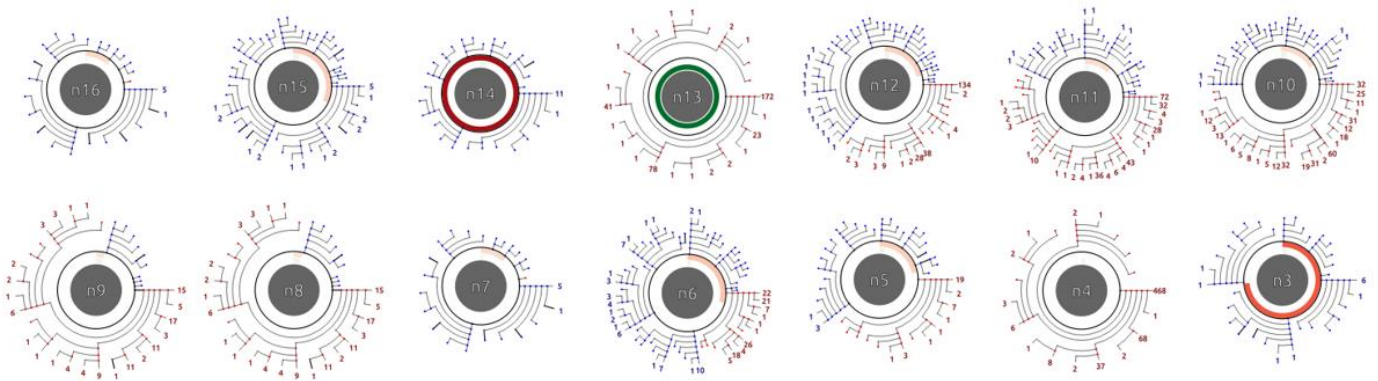


Figura 35 Neuronas de una minicolumna podadas representadas en NeuroScheme

Estas vistas son algunas de las posibles opciones que se encontrarán los neurocientíficos a la hora de usar el software. Cabe destacar que la aplicación cuenta con distintas formas de mostrar la pantalla con un diferente ordenamiento de las neuronas, existiendo la posibilidad de editarlas, asimismo, existe la posibilidad de moverlas libremente por la pantalla. Adicionalmente, es posible escalar la pantalla para centrarnos en las neuronas que se consideran importante.

La edición de las variables morfológicas de las neuronas tendrá la siguiente apariencia (Figura 36): En el centro de la pantalla se observan las neuronas pertenecientes a una minicolumna, mientras que a la derecha se encuentra el menú con las distintas variables morfológicas que se pueden editar. Para que las neuronas sigan un formato común, se editarán en conjunto, por ejemplo, al variar el nivel de poda, se editarán todas las neuronas que se encuentran en la pantalla.

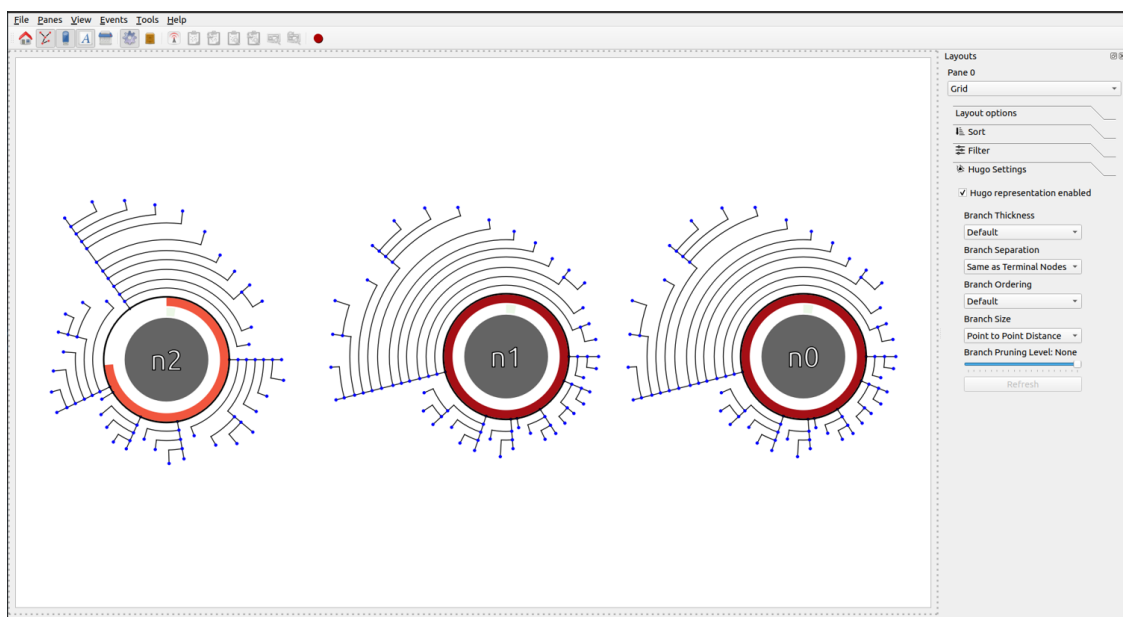


Figura 36. Aplicación NeuroScheme con las neuronas n0, n1 y n2

## Grado en Ingeniería Informática

La aplicación también podrá hacer uso de las características que cuenta NeuroScheme, debido a ello, será posible utilizar la representación ScatterPlot o diagrama de dispersión ya existente en NeuroScheme. En la Figura 37 se muestra un ejemplo en el cual el eje x varía en función de las bifurcaciones de las neuritas y el eje y en función de las bifurcaciones del axón. Como se puede observar, en el lado izquierdo de la pantalla se encuentran las estructuras neuronales con menos bifurcaciones dendríticas y en el lado derecho ocurre lo contrario. Asimismo, en la zona alta de la pantalla se encuentran las representaciones con un mayor número de bifurcaciones axónicas y en la zona inferior ocurre lo contrario. Por ejemplo, la neurona n4, se sitúa arriba a la izquierda puesto que cuenta con un gran número de ramificaciones axónicas, pero con ninguna ramificación dendrítica al no tener dendritas.

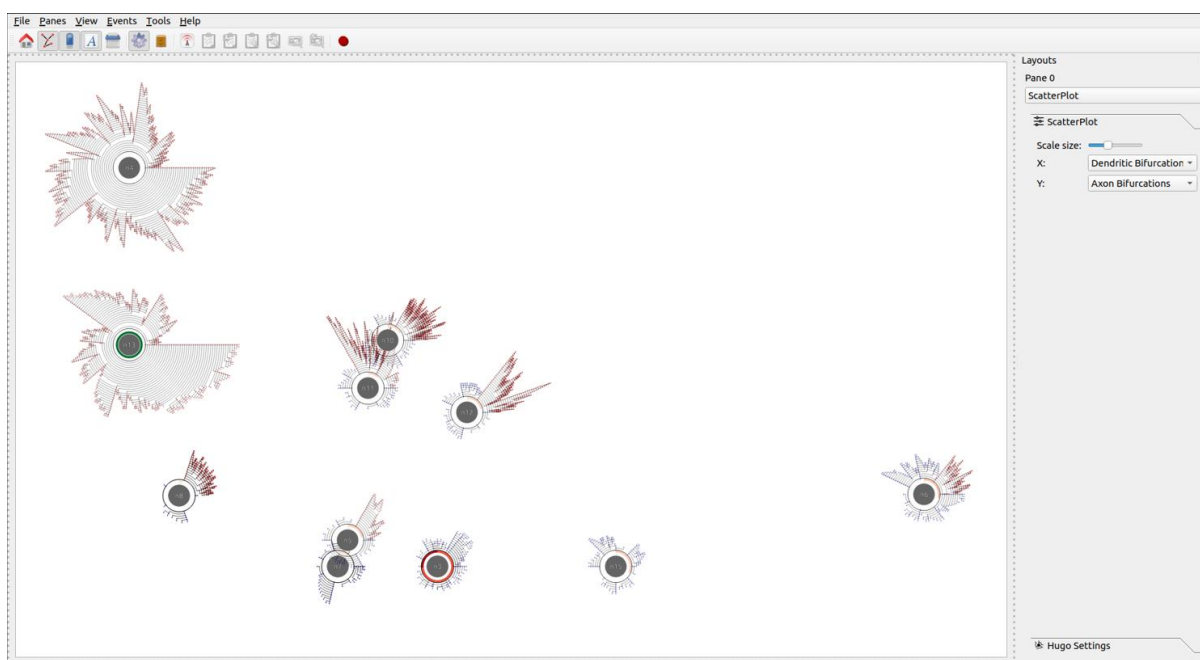


Figura 37. Representación de distintas neuronas usando un diagrama de dispersión para el eje x e y.

### 4.3 Análisis del tiempo de ejecución

En esta sección se realizará un análisis del tiempo que le toma al software representar un número determinado de neuronas. Para ello, se ha diseñado un temporizador que funciona de manera simultánea al propio software de representación.

El experimento se ha realizado con la aplicación ejecutándose de manera remota en un ordenador local. Las medidas se han realizado en distintos dataset que contienen entre 1 y 15 neuronas, todas ellas iguales. Esto se debe a que el tiempo de representación de una neurona dependerá de la complejidad de esta, por lo que haciendo que todas sean iguales se elimina ese factor y se uniformizan los datos.

## Grado en Ingeniería Informática

Los valores de tiempo medidos para cada conjunto de neuronas no son siempre iguales, a pesar de que el número de estas sí lo sea, ya que los recursos que proporciona el ordenador para cada ejecución no siempre son los mismos. Por ello, se ha decidido tomar cinco medidas diferentes de tiempo para cada conjunto de neuronas y, a partir de esos datos, calcular un valor de tiempo promedio  $t$  junto a su error asociado  $\Delta t$ .

Para calcular el error asociado a cada una de estas medidas de tiempo de representación,  $\Delta t$ , se calcula la desviación estándar de los valores  $t_i$  frente a la media  $t_{media}$  usando la siguiente fórmula:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{media})^2}{N - 1}}$$

En este caso, la fórmula utilizada difiere de la utilizada como norma general para los cálculos de desviaciones típicas. Esto es debido a que se ha utilizado la corrección de Bessel (que divide entre  $N - 1$  en vez de entre  $N$ ), que permite ajustar la medida teniendo en cuenta el sesgo añadido por la propia media. Esta corrección es crucial para muestras de datos pequeñas, proporcionando unos valores más precisos sobre cómo varía la muestra en sí. Los valores de tiempo de representación y sus errores asociados para cada uno de los conjuntos de neuronas se muestran en la siguiente tabla.

Número de neuronas	Tiempo de ejecución [s]	Tiempo de ejecución [ms]
1	$(106 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	$10,6 \pm 0,6$
3	$(226 \pm 5) \cdot 10^{-4}$	$22,6 \pm 0,5$
6	$(420 \pm 14) \cdot 10^{-4}$	$42,0 \pm 1,4$
9	$(608 \pm 12) \cdot 10^{-4}$	$60,8 \pm 1,2$
12	$(812 \pm 13) \cdot 10^{-4}$	$81,2 \pm 1,3$
15	$(1034 \pm 8) \cdot 10^{-4}$	$103,4 \pm 0,8$

Tabla 1: Datos de tiempos de ejecución  $t$  asociados a grupos de entre 1 y 15 neuronas, en unidades del sistema internacional [s] y en milisegundos [ms]. Todas las medidas van acompañadas de su error  $\Delta t$ .

A continuación, se muestran en una gráfica los resultados obtenidos en función del número de neuronas representadas. El eje de abscisas se corresponderá con dicho número, mientras que el eje de ordenadas serán los valores de tiempo  $t$  promediados. La línea de tendencia será lineal, con un ajuste que la fuerce a pasar por el origen de coordenadas (cuando no hay neuronas, el tiempo de representación de estas será de 0 segundos). Las barras de error del eje de ordenadas se corresponden con los valores de  $\Delta t$  calculados anteriormente.

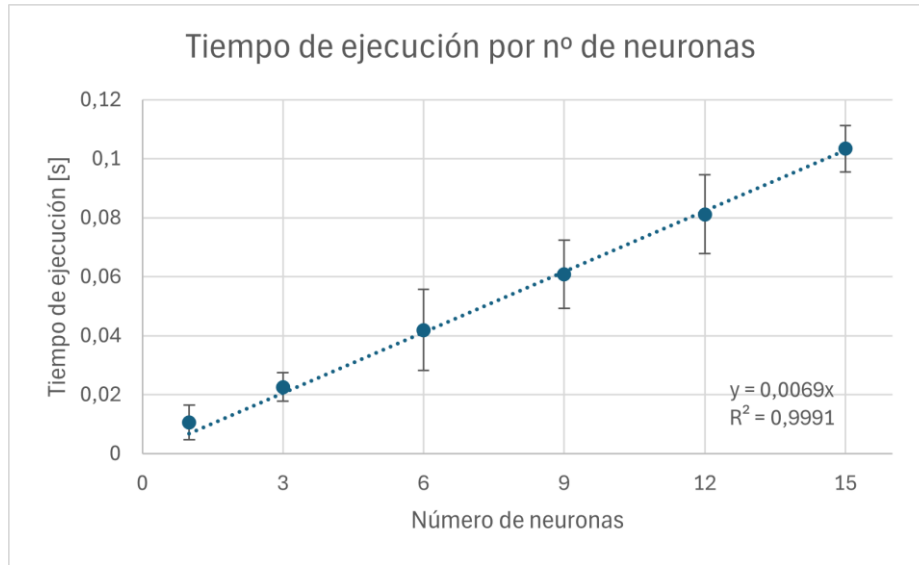


Figura 38: Representación gráfica del tiempo de ejecución promedio  $t$  para los distintos conjuntos de neuronas. Las barras de error del eje de ordenadas se corresponden con los valores de  $\Delta t$ , que han sido multiplicados por un factor 10 para poder visualizarse mejor en comparación unos con otros.

Como se puede observar, hay una fuerte tendencia lineal que se ajusta a la línea teórica, con un valor de  $R^2$  de 0,9991 . Este valor tan alto nos indica que las variables *número de neuronas* y *tiempo de representación* están fuertemente correlacionadas, lo cual cuadra con lo esperado según el planteamiento. La línea de tendencia se ha calculado utilizando la función *ESTIMACION.LINEAL*, con un ajuste por mínimos cuadrados. Su valor, de  $6,9 \cdot 10^{-3}$  [s], va acompañado de un error de  $9 \cdot 10^{-5}$  [s].

Tras haber realizado el análisis del tiempo de ejecución, se ha podido comprobar que la complejidad del software es lineal. Con el objetivo de demostrar que este análisis es preciso y que puede generalizarse a conjuntos de datos mayores, se han estudiado los coeficientes de variación de los resultados medidos experimentalmente. El coeficiente de variación (el cociente entre  $\Delta t$  y  $t$ , expresado como porcentaje) es una medida adimensional que permite comparar el grado de variación relativa entre distintos conjuntos. Al calcularlos, se obtiene lo siguiente:

Número de neuronas	Coficiente de variación (en %)
1	5,6
3	2,2
6	3,3
9	1,9
12	1,7
15	0,8

Tabla 2: Valores del coeficiente de variación, expresados como porcentaje, asociados a cada conjunto de neuronas

## 5. Conclusiones

El objetivo de este capítulo es presentar las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente proyecto citando tanto las conclusiones relacionadas con la aplicación intermedia, con NeuroScheme y con la representación implementada.

La representación esquemática dendrograma se complementa de una forma idónea con la representación ya existente en NeuroScheme y permite modelar la representación de la morfología neuronal de una forma más detallada, consiguiendo así obtener nueva información sin perder la ya existente.

NeuroScheme es un software con una gran variedad de funcionalidades y diversos modos de funcionamiento, el transcurso de este proyecto únicamente se ha centrado en mejorar la funcionalidad existente cortex, pudiendo ser congen una modalidad donde añadir futuras mejoras.

Todas y cada una de las representaciones creadas en el proyecto han ayudado a llegar al objetivo final y pueden servir de una forma u otra en distintos contextos. No obstante, se concluye que la representación dendrograma podría ser la más útil a la hora de visualizar la neurona, ya que consigue representar de una forma más visual y entendible la misma información en comparación el resto de las representaciones creadas.

Hay varios tipos de neuronas muy distintos, pero gracias a aplicaciones como el software desarrollado se pueden analizar sus características y encontrar similitudes. Para ello, es posible utilizar la edición de las variables morfológicas para seleccionar las características que se desean investigar y gracias a ello, encontrar similitudes.

Examinando la aplicación intermedia, se ha conseguido desarrollar una aplicación funcional con diversas características y distintas representaciones con la que he alcanzado el objetivo de comprender de forma ideal el trabajo que se necesitaba realizar. Añadir las representaciones tridimensionales en esta aplicación intermedia ha ayudado a comprender de una mejor forma las estructuras neuronales ya que con ello se puede interactuar entre ambas representaciones y comprender que el trabajo realizado estaba saliendo de una forma satisfactoria. Al igual que desarrollar la representación SHOLL, ya que, con ella, se comprende de una mejor forma el por qué es necesario crear las distintas variables morfológicas para editar las secciones. Asimismo, esta representación es útil para comprender el funcionamiento de la estructura neuronal. Por lo tanto, aunque ciertos desarrollos no se hayan visto reflejados en el software final han sido esenciales en el desarrollo global del mismo.

## Grado en Ingeniería Informática

En segundo lugar, analizando NeuroScheme, es importante destacar que se ha concluido el desarrollo con los objetivos iniciales cumplidos, y que estos son una gran mejora para dicha aplicación. Asimismo, se ha conseguido mejorar la visualización permitiendo escoger las capas a representar. Esto es esencial por la gran cantidad de neuronas que podemos visualizar a la vez en dicha aplicación.

Por último y aunque ya se ha mencionado anteriormente, se quiere recalcar la fusión entre ambas representaciones puesto que se considera que combinan de una forma excelente y pueden ser muy útiles, ya que inicialmente en dendrograma solo se reflejaba la estructura de la neurona obteniendo información del soma, los árboles dendríticos y axonales. En cambio, ahora es posible obtener esta información, y, además, obtener información sobre la morfología y la funcionalidad.

Por otra parte, después de realizar el análisis de tiempo de ejecución, se concluye que al tener el software una complejidad lineal, la representación dendrograma tendrá un tiempo de ejecución asumible para grandes volúmenes de datos. Esto se ve respaldado por el hecho de que los cálculos realizados de manera experimental presentan un coeficiente de variación inferior al 10% en todos los casos, lo cual permite que se asuma una alta precisión de los resultados obtenidos y, por tanto, de la linealidad de estos.

El presente proyecto, por tanto, incluye mejoras sustanciales al software existente proporcionando nuevas formas de representación y nueva información de la estructura neuronal. Asimismo, el desarrollo de Hugo complementa dicha información y abre posibles nuevas líneas de desarrollo e investigación.

### 6. Líneas futuras

El software utilizado ofrece oportunidades de mejora, puesto que no es un proyecto finalizado y es susceptible a futuras actualizaciones. Por lo tanto, existen diversas opciones para mejorar la representación que este software contiene. A continuación, voy a presentar algunas ideas que considero que podrían mejorar dicha aplicación y su interacción con el usuario.

#### 6.1. Añadir nuevas variables morfológicas a dendrograma

Este proyecto se ha centrado en analizar y desarrollar las variables morfológicas más importantes como el volumen de las secciones de una neurita o su tamaño, pero una buena opción para mejorar este software sería poder añadir nuevas variables para editar esta representación y que el usuario obtenga una mayor interacción con la aplicación.

#### 6.2. Posibilidad de continuar con la aplicación intermedia

Continuar el desarrollo del software intermedio desarrollado en la parte inicial del presente proyecto podría ser una oportunidad más que útil, ya que es un software con diversos modos de representación, con grandes líneas de futuras mejoras y que podría ser complementario y compartir información mediante el envío de mensajes con otras aplicaciones del marco Human Brain Project.

#### 6.3. Selección de neuronas en NeuroScheme

Dentro del software NeuroScheme, como se ha comentado anteriormente, la cantidad de estructuras neuronales puede ser muy elevada, para ello, se considera que una forma de mejorar esta aplicación sería ofrecerle la oportunidad al usuario de poder seleccionar los grupos de neuronas que desee para centrarse en ellas y mostrarlas en una pantalla paralela, esto sería una mejora importante dentro del campo de interacción con el usuario.

#### 6.4. Añadir una representación 3D en NeuroScheme

Al igual que se hace en Hugo, podría ser interesante poder añadir la representación tridimensional de la estructura neuronal en el software NeuroScheme. Es cierto que esto se puede conseguir mediante mensajes con otras aplicaciones de este marco de trabajo. Por ejemplo, podemos usar la aplicación NeuroTessMesh para visualizar las mismas neuronas que vemos de forma esquemática en nuestro software. No obstante, se considera

## **Grado en Ingeniería Informática**

que podría ser muy útil poder observar la representación tridimensional de la neurona objetivo sin necesidad de utilizar aplicaciones externas para ello.



### 7. Bibliografía

Aliaga Maraver, J. J., Pastor Pérez, L. I., & Mata Fernández, S. (2022). *Estudio de aplicabilidad del tratamiento informático de los datos de neurociencia para la creación de imágenes no realistas de carácter simbólico*.

Amunts, K., Ebell, C., Muller, J., Telefont, M., Knoll, A., & Lippert, T. (2016). *The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain*. In *Neuron* (Vol. 92, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.10.046>

Appukuttan, S., Bologna, L. L., Schürmann, F., Migliore, M., & Davison, A. P. (2023). *EBRAINS Live Papers - Interactive Resource Sheets for Computational Studies in Neuroscience*. *Neuroinformatics*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s12021-022-09598-z>

Arteaga D., G., & Pimienta J., H. J. (2004). *Sobre la organización columnar de la corteza cerebral*. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, XXXIII (1), 76-101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80615415006>

Ballesteros Jiménez, S. (2009). *Memoria implícita en el envejecimiento normal y en la enfermedad de Alzheimer: un enfoque desde la neurociencia cognitiva*. *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, 44(5). <https://doi.org/10.1016/j.regg.2009.04.004>

Bird, A. D., & Cuntz, H. (2019). *Dissecting Sholl Analysis into Its Functional Components*. *Cell Reports*, 27(10). <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2019.04.097>

*Cumbre final del proyecto sobre el cerebro humano — Logros y futuro de la investigación digital sobre el cerebro | Configurar el futuro digital de Europa*. (2023). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/news/final-human-brain-project-summit-achievements-and-future-digital-brain-research>

Duque Parra, J. E. (1997). *Vista de Las Sinapsis*. <https://revistamedicina.net/index.php/Medicina/article/view/46-6/903>

Mehta, K., Ljungquist, B., Ogden, J., Nanda, S., Ascoli, R. G., Ng, L., & Ascoli, G. A. (2023). *Online conversion of reconstructed neural morphologies into standardized SWC format*. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42931-x>

*nsol: Documentation*. (2015). <https://vg-lab.github.io/doc/nsol/>

Pastor, L., Mata, S., Toharia, P., Bayona, S., Brito, J. P., & Garcia-Cantero, J. J. (2015). *NeuroScheme: Efficient multiscale representations for the visual exploration of morphological data in the human brain neocortex*. *25th Spanish Computer Graphics Conference, CEIG 2015*. <https://doi.org/10.2312/ceig.20151208>

## Grado en Ingeniería Informática

*Visor de libros.* (n.d.). Retrieved June 25, 2024, from [https://www.educa2.madrid.org/web/argos/asclepio/-/book/atlas-de-histologia4?\\_book\\_viewer\\_WAR cms\\_tools\\_chapterIndex=7935088d-4b4d-464a-a284-f5b0aad7d388](https://www.educa2.madrid.org/web/argos/asclepio/-/book/atlas-de-histologia4?_book_viewer_WAR cms_tools_chapterIndex=7935088d-4b4d-464a-a284-f5b0aad7d388)