

## **Convocatoria de Ayudas Beatriz Galindo**

### **Documento C: Proyecto de necesidad de investigación y transferencia del conocimiento de la Universidad**

El candidato se incorporará como IP al Laboratorio de Inteligencia Natural y Diseñada de la UPV que forma parte de la línea de investigación “Física aplicada a la detección de astropartículas y sistemas inteligentes” del Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC). La línea de investigación que se plantea, dentro del marco de la inteligencia natural y diseñada, estará centrada en entender los principios computacionales que permiten a las redes neuronales del cerebro realizar funciones complejas, y en diseñar nuevos algoritmos de IA y nuevas neurotecnologías basados en dichos principios. Este proyecto plantea generar resultados en la frontera del conocimiento, desarrollando tecnologías de vanguardia que combinan metodologías de varias disciplinas punteras, y que aborda tanto ramas básicas del conocimiento (estudio y comprensión de procesos neuronales) como de aplicación eminentemente práctica en el sector tecnológico (desarrollo de nuevos algoritmos de aprendizaje automático y neurotecnologías).

#### **1.º Investigación planificada por la Universidad.**

El proyecto de investigación y transferencia de conocimiento presentado en esta convocatoria BG Junior se encuentra dividido en 3 líneas de investigación principales que el candidato desarrollará a lo largo de su contrato:

- I. Caracterizar las propiedades a nivel neuronal que definen las dinámicas de los circuitos neuronales en la corteza, y que dan lugar a diferentes regímenes computacionales.**
- II. Diseñar sistemas de IA novedosos que aprovechen los diferentes regímenes dinámicos observados en la corteza, dando lugar a una computación general y eficiente.**
- III. Desarrollar la próxima generación de neurotecnologías cognitivas autónomas.**

Además de desarrollar estas áreas, se prevé que el candidato forme parte de una red de investigadores e instituciones de reconocido prestigio internacional.

- I. Caracterizar las propiedades a nivel neuronal que definen las dinámicas de los circuitos neuronales en la corteza, y que dan lugar a diferentes regímenes computacionales.**

*El objetivo de esta línea de investigación es desentrañar los mecanismos plásticos del cerebro responsables de establecer las propiedades intrínsecas de conectividad de las áreas cognitivas inferiores frente a las superiores – que presentan diferencias fundamentales – y estudiar su impacto en las dinámicas de los circuitos.*

Hallazgos recientes han revelado que existe un fascinante gradiente de excitación e inhibición a lo largo de la jerarquía cortical (Wang, 2020, *Nature Reviews Neuroscience*). En particular, se ha encontrado que las áreas cognitivas superiores tienen más conexiones excitatorias y menos neuronas inhibitorias en general. Crucialmente, este gradiente se ve alterado en muchos trastornos neuropsiquiátricos, como la esquizofrenia y el autismo, lo que indica que podría subyacer a aspectos fundamentales de nuestra cognición.

Comprender cómo se establece este gradiente y su relación con las dinámicas emergentes de los circuitos en diferentes áreas del cerebro es fundamental para entender la computación cerebral. Estas propiedades pueden analizarse mediante la combinación de simulaciones y observaciones experimentales: por un lado, podemos diseñar modelos matemáticos de plasticidad cortical que reproduzcan la emergencia no supervisada de los regímenes dinámicos observados en las áreas corticales y para estudiar las propiedades computacionales que definen cada área; por otro, las dinámicas de red, las conductancias sinápticas, las propiedades intrínsecas de potencial de acción y la conectividad funcional de los tipos de células excitatorias e inhibitorias pueden medirse mediante técnicas como la electrofisiología y la imagen de calcio.

**Los objetivos específicos dentro de esta línea de investigación son:**

1. Comprender las reglas de plasticidad que establecen el gradiente biológico observado.
2. Construir modelos que reproduzcan las dinámicas de las distintas áreas corticales.
3. Usar la ingeniería inversa en los modelos para entender los diferentes regímenes computacionales.
4. Generar una base de datos con las métricas neuronales de diferentes áreas corticales, que estará disponible gratuitamente para la comunidad científica.
5. Desarrollar un paquete de código abierto para analizar los datos neuronales y construir los modelos.

**II. Diseñar sistemas de IA novedosos que aprovechen los diferentes regímenes dinámicos observados en la corteza dando lugar a una computación general y eficiente.**

*El objetivo de esta línea de investigación es incorporar los principios que definen los diferentes regímenes dinámicos de la corteza en novedosos algoritmos bioinspirados.*

Las tecnologías IA futuras prometen estar dotadas del tipo de capacidades de aprendizaje y resolución de problemas que tienen los humanos. Para alcanzar este nivel de inteligencia, los algoritmos deben ser robustos frente a desafíos de aprendizaje conocidos en IA, como el olvido catastrófico o los ataques adversariales, y ser capaces de navegar la complejidad de nuestro entorno en tiempo real. Para ello, los algoritmos de aprendizaje deben operar continuamente de modo que los agentes de IA:

- Puedan cambiar entre múltiples tareas de forma natural.
- Sean conscientes del entorno y del contexto.
- Puedan asociar conocimientos mediante aprendizaje curricular.
- Sean computacionalmente eficientes y robustos al ruido.
- Se supervisen a sí mismos con componentes de metacognición y metaaprendizaje.

Para lograr estas propiedades, el candidato integrará reglas de plasticidad biológica, para que las redes neuronales artificiales puedan configurarse en regímenes dinámicos favorables para diferentes cálculos. Por ejemplo, se ha hipotetizado que un cambio en los regímenes dinámicos

es el medio por el cual las redes en áreas cerebrales de orden superior pueden adaptarse con celeridad a diferentes tareas (Mante et al., 2013; Soldado-Magraner et al., 2024).

El objetivo de esta línea de investigación es acercar la inteligencia artificial a la inteligencia natural del cerebro para superar las limitaciones de la IA actuales. La inteligencia natural ha sido moldeada acorde a la escala evolutiva. Planteamos acelerar la evolución de la inteligencia artificial comprendiendo mejor los principios computacionales que rigen el cerebro. Al adoptar estos principios, podemos mejorar las tecnologías futuras a un ritmo mucho más rápido. A su vez, la IA también tiene el potencial de acelerar nuestra comprensión del cerebro. Por ejemplo, podremos analizar datos neuronales más rápida y profundamente con algoritmos de IA, y podremos probar hipótesis sobre la función y disfunción cerebral de una manera más autónoma y objetiva mediante el uso de modelos computacionales que evolucionan a través del aprendizaje.

### III. Desarrollar la próxima generación de neurotecnologías cognitivas autónomas.

*El objetivo de esta línea de investigación es desarrollar dispositivos computacionales implementados en hardware neuromórfico, que, al igual que el cerebro, sean de bajo consumo energético y baja latencia, puedan funcionar de forma autónoma, e integrarse con redes cerebrales reales.*

La próxima generación de neurotecnologías consistirá en dispositivos implantables biocompatibles y de alta capacidad que puedan registrar grandes cantidades de datos. Sin embargo, carecemos de marcos teóricos que puedan guiar la interpretación de estos complejos datos biológicos, lo que dificulta el diseño de tecnologías que puedan interactuar de manera efectiva con el cerebro. El objetivo de nuestro grupo es catalizar el desarrollo de neurotecnologías utilizando la teoría de sistemas dinámicos.

Basándonos en el conocimiento sobre la dinámica y la computación cerebral obtenido en las líneas de investigación previas, desarrollaremos marcos teóricos de control para construir interfaces cerebro-computadora (BCIs, por sus siglas en inglés) bidireccionales que puedan comunicarse con el cerebro en tiempo real. Estas neurotecnologías podrían utilizarse en el futuro para devolver las dinámicas cerebrales a regímenes saludables (por ejemplo, controlando crisis epilépticas) y para restaurar funciones perdidas (por ejemplo, proporcionando entradas visuales artificiales directamente al cerebro de personas ciegas).

Paralelamente, el grupo investigará neurotecnologías que aprovechen el hardware neuromórfico. Estas consistirán en chips neuromórficos a pequeña escala y de bajo consumo energético, con neuronas basadas en silicio que se integrarán en los circuitos cerebrales. Se explorará cómo las redes neuromórficas pueden configurarse y acoplarse dinámicamente con las redes cerebrales para lograr el control en tiempo real de la actividad cerebral durante períodos prolongados. En el futuro, el candidato podría establecer colaboraciones sólidas con investigadores del Centro Nacional de Neurotecnología, que se construirá en Madrid, y que se proyecta como una de las principales instituciones para la investigación en neurotecnología a nivel global.

**En conjunto, el objetivo de la investigación propuesta es identificar los mecanismos que la evolución ha seleccionado para autoconfigurar las redes neuronales biológicas como dispositivos computacionales potentes.** Nuestro propósito es comprender cómo estos principios computacionales apoyan las funciones cognitivas de alto nivel y subyacen en las

enfermedades. **El objetivo final es incorporar estos principios en algoritmos artificiales inspirados en el cerebro para mejorar los algoritmos de IA y las futuras neurotecnologías.**

Creemos firmemente que este es el momento de invertir esfuerzos en este enfoque y entendemos que las ayudas Beatriz Galindo pueden ser una oportunidad para contribuir desde la UPV a este próximo avance de la IA. No existen iniciativas a nivel nacional con este alcance, a pesar del auge y éxito de programas similares a nivel internacional. Vislumbramos que la UPV pueda ser pionera en este campo en España, convirtiéndose en un líder europeo reconocido y un socio internacional destacado.

## **2.º Transferencia del conocimiento planificada por la Universidad.**

Es importante remarcar que en esta línea de investigación se va a abordar dos campos situados en la frontera del conocimiento: el desarrollo de nuevos algoritmos de inteligencia artificial basados, y el desarrollo de nuevas neurotecnologías. El desarrollo de todas estas tecnologías tendrá un alto potencial de transferencia tanto a la industria como a otros centros de investigación interesados en I+D para fines clínicos (como hospitales) o de investigación. Un punto crucial a enfatizar es que este nuevo campo planea ser catapultado en España con un nuevo proyecto novedoso y puntero: la creación del **Centro Nacional de Neurotecnología (CNN)**, que se espera sitúe a España como país líder en el desarrollo de neurotecnologías.

Esta solicitud pretende ayudar a posicionar a la UPV entre las principales universidades técnicas en investigación en neurotecnologías y neuro-IA, y establecer colaboraciones con instituciones líderes en el campo (como el futuro CNN). Nuestro objetivo es investigar y obtener subvenciones nacionales y europeas de reconocido prestigio, como las otorgadas por el Consejo Europeo de Investigación (ERC, por sus siglas en inglés). También reconocemos que esta investigación tiene un fuerte potencial para la transferencia de conocimiento y la consolidación de patentes. Nos interesa especialmente establecer colaboraciones estrechas con socios industriales en el área, y potencialmente crear una spin-off en la UPV, donde se diseñen aplicaciones comerciales para tecnologías innovadoras y disruptivas, y desde donde se puedan financiar programas de I+D en neuroIA.

Las líneas a desarrollar se encuentran en un campo de investigación emergente, y algunas de sus aplicaciones incluso en la frontera del conocimiento, como es el caso de las tecnologías de computación neuromórficas y los sistemas de interfaz cerebro-máquina. Sus aplicaciones implican la colaboración activa del IGIC con centros de investigación CSIC, institutos tecnológicos como el ITI, investigadores de otras universidades, y empresas como AiQUOS y SynSense. Las sinergias generadas permitirán establecer nuevas metas y retos que permitirán generar vías de aplicación en diferentes ramas del conocimiento.

El conocimiento, investigación y desarrollo será divulgado a través de diferentes medios. De cara a la comunidad científica, el candidato generará artículos científicos (open access) que serán publicados en revistas relacionadas con i) la neurociencia computacional, ii) la inteligencia natural o iii) la neuroingeniería. Además, los resultados serán presentados en congresos internacionales para establecer nuevos contactos y sinergias con otros grupos de investigación internacionales. En el ámbito académico, el programa de investigación planteado permitirá el desarrollo de TFGs, TFM, y Tesis Doctorales. A más largo plazo, el conocimiento generado se adaptará y transmitirá principalmente a través de nuevas asignaturas de Máster impartidas en la UPV a través de la docencia del propio candidato.

Finalmente, para la difusión de la investigación a otros tipos de audiencia, se realizarán actividades para el público en general a través de eventos como el Día de la Ciencia, y se promoverán colaboraciones con ONGs como "TReND in Africa" para fortalecer y divulgar la ciencia en países de bajos recursos. La agenda y contenidos de estas actividades se difundirán a través de televisión, radio y redes sociales.

## Document C: Research and Knowledge Transfer Project of the University

The candidate will join the Natural and Designed Intelligence Laboratory at UPV as Principal Investigator (PI), which is part of the research line "Applied Physics for Astroparticle Detection and Intelligent Systems" within the Research Institute for Integrated Management of Coastal Areas (IGIC). The proposed research line, framed within the context of natural and designed intelligence, will focus on understanding the computational principles that enable the brain's neural networks to perform complex functions and designing new AI algorithms and neurotechnologies based on these principles. This project aims to generate cutting-edge results, developing frontier technologies that combine methodologies from leading disciplines, addressing both fundamental knowledge (the study and understanding of neural processes) and practical applications in the technology sector (development of new machine learning algorithms and neurotechnologies).

### 1. Research planned by the University

The research and knowledge transfer project presented for this BG Junior call is divided into three main research lines that the candidate will develop during their contract:

- I. Characterizing neuronal-level properties that define the dynamics of neural circuits in the cortex, leading to different computational regimes.**
- II. Designing innovative AI systems that leverage the various dynamic regimes observed in the cortex, enabling general and efficient computation.**
- III. Developing the next generation of autonomous cognitive neurotechnologies.**

Additionally, the candidate is expected to be part of a network of internationally renowned researchers and institutions.

- I. Characterizing neuronal-level properties that define the dynamics of neural circuits in the cortex and leading to different computational regimes**

*The goal of this research line is to unravel the brain's plastic mechanisms responsible for establishing the intrinsic connectivity properties of lower versus higher cognitive areas—which exhibit fundamental differences—and study their impact on circuit dynamics.*

Recent findings have revealed a fascinating gradient of excitation and inhibition across the cortical hierarchy (Wang, 2020, *Nature Reviews Neuroscience*). Specifically, higher cognitive areas have been found to possess more excitatory connections and fewer inhibitory neurons overall. Crucially, this gradient is altered in many neuropsychiatric disorders, such as schizophrenia and autism, indicating it may underlie fundamental aspects of cognition.

Understanding how this gradient is established and its relationship to the emergent dynamics of circuits in different brain areas is essential to understanding brain computation. These properties can be analyzed through a combination of simulations and experimental observations. On one hand, mathematical models of cortical plasticity can be designed to replicate the unsupervised emergence of dynamic regimes observed in cortical areas and study the computational properties defining each area. On the other hand, network dynamics, synaptic conductances, intrinsic action potential properties, and the functional connectivity of excitatory and inhibitory cell types can be measured through techniques such as electrophysiology and calcium imaging.



**Specific objectives within this research line include:**

- Understanding the plasticity rules that establish the observed biological gradient.
- Building models that replicate the dynamics of various cortical areas.
- Using reverse engineering on the models to understand the different computational regimes.
- Creating a database of neural metrics for different cortical areas, freely available to the scientific community.
- Developing an open-source code package for analyzing neural data and building the models.

**II. Designing innovative AI systems that leverage the different dynamic regimes observed in the cortex, enabling general and efficient computation**

*The goal of this research line is to incorporate principles defining the different dynamic regimes of the cortex into novel bio-inspired algorithms.*

Future AI technologies promise to possess human-like learning and problem-solving capabilities. To achieve this level of intelligence, algorithms must be robust against known learning challenges in AI, such as catastrophic forgetting or adversarial attacks, and capable of navigating the complexity of our environment in real time. For this, learning algorithms must operate continuously so that AI agents:

- Can naturally switch between multiple tasks.
- Are aware of the environment and context.
- Can associate knowledge through curricular learning.
- Are computationally efficient and noise-robust.
- Self-monitor with components of metacognition and meta-learning.

To achieve these properties, the candidate will integrate biological plasticity rules to configure artificial neural networks into dynamic regimes favorable for various computations. For example, it has been hypothesized that changes in dynamic regimes are how networks in higher-order brain areas adapt rapidly to different tasks (Mante et al., 2013; Soldado-Magraner et al., 2024).

The goal of this research line is to bring artificial intelligence closer to the brain's natural intelligence to overcome current AI limitations. Natural intelligence has been shaped over evolutionary timescales. We propose to accelerate the evolution of artificial intelligence by better understanding the computational principles governing the brain. By adopting these principles, we can enhance future technologies at a much faster rate. At the same time, AI also has the potential to accelerate our understanding of the brain. For instance, we can analyze neural data more quickly and deeply with AI algorithms, and test hypotheses about brain function and dysfunction more autonomously and objectively using computational models that evolve through learning.

**III. Developing the next generation of autonomous cognitive neurotechnologies**

*The goal of this research line is to develop computational devices implemented on neuromorphic hardware that, like the brain, are low-power, low-latency, autonomous, and capable of integration with real neural networks.*

The next generation of neurotechnologies will consist of implantable, biocompatible, high-capacity devices capable of recording large amounts of data. However, we lack theoretical frameworks to guide the interpretation of this complex biological data, hindering the design of technologies that can effectively interact with the brain. Our group aims to catalyze the development of neurotechnologies using dynamic systems theory.

Building on knowledge about brain dynamics and computation obtained in previous research lines, we will develop theoretical control frameworks to build bidirectional brain-computer interfaces (BCIs) capable of real-time communication with the brain. These neurotechnologies could be used in the future to restore brain dynamics to healthy regimes (e.g., controlling epileptic seizures) and restore lost functions (e.g., providing artificial visual inputs directly to the brains of blind individuals).

Simultaneously, the group will investigate neurotechnologies leveraging neuromorphic hardware. These will consist of small-scale, energy-efficient neuromorphic chips with silicon-based neurons integrated into brain circuits. We will explore how neuromorphic networks can be dynamically configured and coupled with brain networks to achieve real-time control of brain activity over extended periods.

In the future, the candidate could establish strong collaborations with researchers at the National Center for Neurotechnology (CNN) in Madrid, envisioned as one of the leading institutions for neurotechnology research worldwide.

**In summary, the goal of the proposed research is to identify the mechanisms evolution has selected to self-configure biological neural networks as powerful computational devices. Our aim is to understand how these computational principles support high-level cognitive functions and underlie diseases. Ultimately, we aim to incorporate these principles into brain-inspired artificial algorithms to improve AI algorithms and future neurotechnologies.**

We firmly believe that this is the right time to invest efforts in this approach, and we understand that the Beatriz Galindo grants represent an opportunity for UPV to contribute to the next advancements in AI. There are no national initiatives with this scope, despite the rise and success of similar programs internationally. We envision UPV becoming a pioneer in this field in Spain, establishing itself as a recognized European leader and a prominent international partner.

## 2. Knowledge transfer planned by the University

It is important to highlight that this research line will address two fields at the forefront of knowledge: the development of new artificial intelligence algorithms and the development of new neurotechnologies. The advancement of these technologies will have high potential for transfer both to the industry and other research centers interested in R&D for clinical purposes (such as hospitals) or academic research. A crucial point to emphasize is that this new field aims to be catapulted in Spain through an innovative and cutting-edge project: the creation of the **National Center for Neurotechnology (CNN)**, which is expected to position Spain as a leading country in the development of neurotechnologies.

This proposal seeks to position UPV among the leading technical universities in



neurotechnology and neuroAI research, and to establish collaborations with leading institutions in the field (such as the future CNN). Our goal is to conduct research and secure prestigious national and European grants, such as those awarded by the European Research Council (ERC). We also recognize that this research has strong potential for knowledge transfer and patent consolidation. We are particularly interested in establishing close collaborations with industrial partners in this area and potentially creating a **spin-off** at UPV, where innovative and disruptive technologies can be designed and commercial applications developed. This spin-off could also fund further R&D programs in neuroAI.

The research lines to be developed are in an emerging field, and some of their applications are even at the cutting edge of knowledge, such as neuromorphic computing technologies and brain-machine interface systems. These applications require active collaboration between the IGIC and CSIC research centers, technological institutes such as ITI, researchers from other universities, and companies like AiQUOS and SynSense. The synergies generated will allow for setting new goals and challenges, generating pathways for applications across different branches of knowledge.

Knowledge, research, and development will be disseminated through various channels. To the scientific community, the candidate will produce (open access) scientific articles published in journals related to i) computational neuroscience, ii) natural intelligence, or iii) neuroengineering. Additionally, the results will be presented at international conferences to establish new connections and synergies with other international research groups. In the academic field, the proposed research program will facilitate the development of undergraduate final projects (TFGs), master's theses (TFMs), and doctoral theses. In the long term, the knowledge generated will be adapted and transmitted primarily through new master's courses taught at UPV by the candidate.

Finally, to disseminate the research to other types of audiences, activities will be organized for the general public through events such as Science Day, and collaborations with NGOs like TRéND in Africa will be promoted to strengthen and spread science in low-resource countries. The agenda and content of these activities will be disseminated through television, radio, and social media.