

ISSN: 1668-9178

cet

N° 47

Año XXXIII

Diciembre 2024

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN

facet



Dirección científica: Nicolás Nieva

Dirección ejecutiva: Ana G. Elías - Liliana Abascal

ISSN 1668-9178



AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN

Rector Ing. Sergio José Pagani

Vicerrectora Dra. Mercedes Leal

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

Decano Dr. Ing. Miguel Ángel Cabrera

Vicedecano Mg. Ing. Eduardo Martel

cet - Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería

Comisión Asesora: Dra. Paula Araujo, Dra. Ana G. Elías, Dra. Cecilia Zapata.

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Liliana del Valle Abascal

Mg. Carlos Albaca Paraván

Dra. Paula Araujo

Dr. Adolfo María Ávila

Dra. Ana G. Elías

Mg. María Isabel Giannini

Dra. Mariela González

Ing. Gustavo Eduardo Juárez

Ing. Nicolás Majorel Padilla

Dr. Eduardo Manzano

Dr. Oscar Alonso Marín Ramírez

Ing. Nora Perotti

Dr. Antonio Orlando

Ing. José Antonio Palacios

Dra. Sonia Vrech

Dra. Cecilia Zapata

Esta publicación figura en el Directorio de Latindex

Clasificación Decimal Universal (CDU): 501- 62

Director: nnieva@herrera.unt.edu.ar

E-mail: revista@herrera.unt.edu.ar

El contenido de los trabajos firmados no representa necesariamente la opinión del editor, siendo de exclusiva responsabilidad de los autores.

Registro de Propiedad Intelectual: Nº 303943 – ISSN 1668-9178

Este número cerró el 31/12/2024

CONTENIDO

EDITORIAL

Número 47	4
------------------	---

INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN

Diseño de un transistor de efecto campo empleando resina fotosensible como dieléctrico de compuerta	5
--	---

Autores: MARTÍN, Balthazar; ZAPATA, Cecilia; FIGUEROA, Cristian; BRIDOUX, German; VILLAFUERTE, Manuel; JIMÉNEZ, Gustavo

Efecto de la polilisina y N-acetilcisteína sobre mantas de policaprolactona en cultivo celular	14
---	----

Autores: BUSI, Aldana; ARGANARAZ AYBAR, Julio; KOZUSZKO, Silvia; MONSALVE, Leandro; RODRIGUEZ, Andrea

Optimización de anclajes y acopladores para sistemas de postensado mediante modelos numéricos	24
--	----

Autores: CORDERO, Mariela; APARICIO BENGOCHEA, Ángel

Atlas de radiación solar en la región del Noroeste Argentino basado en datos de reanálisis	32
---	----

Autores: SILVERO, Cristóbal; MEDINA, Franco; ZOSSI, Bruno; ELÍAS, Ana

NOTAS, ARTE Y OPINIÓN

Universidades en transformación. El modelo humboldtiano, entre tradición y adaptación	40
--	----

Autores: NIEVA, Nicolás; CABRERA, Miguel

cet - REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA	48
--	----

INSTRUCCIONES PARA AUTORES	49
----------------------------	----

Imagen de tapa: Microfotografías electrónicas de barrido de scaffolds de policaprolactona (Busi, A. et al)

EDITORIAL

Número 47

La presente edición de la Revista CET reúne contribuciones que evidencian la madurez y diversidad de la actividad científico-tecnológica desarrollada en nuestra Facultad, así como las contribuciones de otras instituciones universitarias y organismos de ciencia y técnica y su proyección tanto regional como internacional. Los trabajos compilados transitan desde innovaciones en microelectrónica y biomateriales hasta soluciones para el aprovechamiento energético sustentable y la optimización estructural, concluyendo con una reflexión necesaria sobre el devenir de la universidad pública argentina.

En la sección **Investigación, Desarrollo e Innovación**, Martín y su equipo presentan una propuesta innovadora para la fabricación de transistores de efecto campo utilizando resinas fotosensibles comerciales como dieléctricos de compuerta. Este trabajo demuestra que es posible alcanzar resolución nanométrica mediante técnicas accesibles y de bajo costo, abriendo perspectivas promisorias para la democratización de tecnologías de manufactura de dispositivos electrónicos en contextos con recursos limitados.

Busi y colaboradores incursionan en el campo de la ingeniería de tejidos mediante el desarrollo de mantas de policaprolactona funcionalizadas con polilisina y N-acetilcisteína. Su investigación aborda uno de los obstáculos más significativos en la regeneración de lesiones del sistema nervioso central: el control de la respuesta inflamatoria y la formación de cicatrices gliales. Los resultados obtenidos en cultivos celulares sugieren que la biofuncionalización de scaffolds poliméricos constituye una estrategia viable para aplicaciones regenerativas avanzadas.

Cordero y Aparicio Bengoechea contribuyen al perfeccionamiento de sistemas de postensado mediante la optimización de anclajes y acopladores utilizando modelos numéricos. Este trabajo ejemplifica cómo la simulación computacional puede trascender el enfoque empírico tradicional del sector de la construcción, conduciendo a diseños más eficientes desde el punto de vista material y estructural, con validación experimental que respalda su implementación práctica.

Silvero y su equipo ofrecen una herramienta de relevancia estratégica para la región: un atlas de radiación solar en superficie para el Noroeste Argentino. Mediante el procesamiento de bases de datos de reanálisis, los autores compensan la escasez de estaciones meteorológicas de medición directa, generando información crítica para la planificación de proyectos fotovoltaicos y el diseño de políticas de transición energética sustentable.

En la sección **Notas, Arte y Opinión**, Nieva y Cabrera nos invitan a reflexionar sobre un tema de particular actualidad: la vigencia del modelo universitario humboldtiano en el contexto argentino contemporáneo. Su análisis histórico y comparativo interpela la capacidad de nuestras instituciones de educación superior para mantener su autonomía, excelencia académica y compromiso social en un escenario atravesado por profundas tensiones políticas, económicas y culturales. Esta contribución adquiere especial relevancia en momentos donde la universidad pública enfrenta desafíos estructurales que demandan no solo resistencia, sino también imaginación institucional para preservar su misión fundacional sin renunciar a la necesaria adaptación a los tiempos presentes.

Invitamos a nuestros lectores a recorrer estas páginas que, en su diversidad temática y profundidad analítica, dan testimonio del compromiso de nuestra comunidad académica con la generación de conocimiento riguroso, socialmente relevante y científicamente fundamentado.

Comité Editorial

Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería CET
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán

Diseño de un transistor de efecto campo empleando resina fotosensible como dieléctrico de compuerta

MARTÍN, Balthazar ¹; ZAPATA, Cecilia ²; FIGUEROA, Cristian ³; BRIDOUX, German ²; VILLAFUERTE, Manuel ²; JIMÉNEZ, Gustavo ⁴

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina.

² Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

³ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

⁴ CONICET. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-TUCUMÁN). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, CP 4000, Tucumán, R. Argentina.

Resumen

Se presenta la fabricación y caracterización de un transistor de efecto de campo (FET) utilizando una resina polimérica fotosensible (RPF) como dieléctrico de compuerta. Esto se llevó a cabo en tres etapas. En primer lugar, se caracterizó la RPF para determinar su constante dieléctrica mediante un circuito RC, diseñando y fabricando capacitores sobre películas de ITO con técnicas de recubrimiento por rotación (*spin coating*), tratamiento térmico y fotolitografía. En la segunda etapa, se fabricaron FETs con láminas de ZnO/Si y BaSnO₃/SrTiO₃, empleando grabado químico (*chemical etching*) para definir el canal semiconductor y contactos de indio e hilos de oro para las terminales. Finalmente, se realizaron estudios eléctricos midiendo la corriente de drenaje en función de la tensión de drenaje y compuerta, ajustando los resultados a modelos MOSFET para determinar movilidad, tensión de umbral y otros parámetros característicos. Los FETs de ZnO presentaron comportamiento esperado, validando su potencial para aplicaciones electrónicas. En las láminas de BaSnO₃ se identificaron desafíos en la caracterización, lo que sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de fabricación. Este trabajo demuestra la viabilidad de la RPF de bajo costo para litografía óptica, como también su aplicación en la producción de dispositivos semiconductores en el rango nanométrico.

Palabras clave: Transistor, Semiconductores, Dieléctrico.

Design of a field-effect transistor using photosensitive resin as gate dielectric

Abstract

This work presents the fabrication and characterization of a field-effect transistor (FET) using a photosensitive polymer resin (PPR) as the gate dielectric. The research was conducted in three stages. First, the PPR was characterized to determine its dielectric constant using an RC circuit, designing and fabricating capacitors on ITO films with spin coating, thermal treatment, and photolithography. Then, FETs were fabricated using films of ZnO/Si and BaSnO₃/SrTiO₃, employing chemical etching to define the semiconductor channel and indium and gold contacts for the gate, source, and drain. Finally, electrical studies were performed by measuring the drain current as a function of drain and gate

voltages, fitting the results to MOSFET models to determine mobility, threshold voltage, and other key parameters. The ZnO-based FETs exhibited expected behavior, validating their potential for electronic applications. In contrast, BaSnO₃ devices faced characterization challenges, suggesting improvements in fabrication conditions. This work demonstrates the feasibility of low-cost PPR for optical lithography and its application in semiconductor device production with nanometric-scale resolution.

Keywords: Transistor, Semiconductors, Dielectric.

Introducción

El desarrollo de dispositivos electrónicos basados en nuevos óxidos semiconductores ha emergido como una alternativa prometedora para la fabricación de transistores de efecto de campo (FET), ya que presentan propiedades eléctricas y ópticas atractivas, como una alta movilidad electrónica y una banda prohibida amplia. En particular, el ZnO (Özgür y Morkoç, 2009) y el BaSnO₃ (Aggoune et al., 2022) han sido objeto de estudio debido a su potencial aplicación en la electrónica transparente y de alta potencia.

Por otro lado, la implementación de materiales dieléctricos alternativos en la compuerta de los FETs es un aspecto clave para optimizar su rendimiento. Las resinas poliméricas fotosensibles (RPF) han demostrado ser una opción viable y de bajo costo para la fabricación de capas dieléctricas en dispositivos electrónicos mediante técnicas de litografía óptica. Sin embargo, su caracterización y desempeño en transistores aún requieren un análisis detallado para determinar su efectividad y viabilidad en aplicaciones prácticas.

El objetivo de este trabajo es fabricar y caracterizar un FET empleando una RPF comercial como dieléctrico de compuerta, explorando su influencia en el rendimiento del dispositivo.

Para ello, se llevaron a cabo estudios experimentales en tres etapas: (i) caracterización de la RPF mediante la determinación de su constante dieléctrica, (ii) fabricación de FETs con ZnO/Si y BaSnO₃/SrTiO₃, y (iii) análisis eléctrico de los dispositivos obtenidos. Se emplearon técnicas avanzadas como *spin coating*, tratamiento térmico, *etching* químico y fotolitografía para la fabricación y caracterización de los dispositivos.

Investigaciones previas han demostrado que el ZnO es un material ampliamente estudiado en la industria de los semiconductores (Figueroa,

2021), mientras que el BaSnO₃ se presenta como una alternativa emergente con propiedades eléctricas favorables (Hyung et al., 2012), aunque su integración en dispositivos electrónicos aún enfrenta desafíos técnicos. Asimismo, diversos estudios han explorado el uso de polímeros fotosensibles en procesos de litografía, resaltando su capacidad para generar estructuras con resolución en el rango nanométrico.

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de dispositivos electrónicos híbridos mediante la combinación de nuevos materiales semiconductores y técnicas de fabricación accesibles, evaluando el impacto de la RPF como dieléctrico de compuerta en FETs experimentales.

Desarrollo

Caracterización de la resina polimérica fotosensible

Para determinar la viabilidad de la resina polimérica fotosensible (RPF) como dieléctrico de compuerta en un transistor de efecto de campo (FET) (Choi y Yoo, 2023), se caracterizaron sus propiedades dieléctricas. Se fabricaron capacitores utilizando RPF depositada sobre una película de óxido de indio y estaño (ITO) en un sustrato de vidrio de 5mm x 5mm como se observa en la Fig. 1.

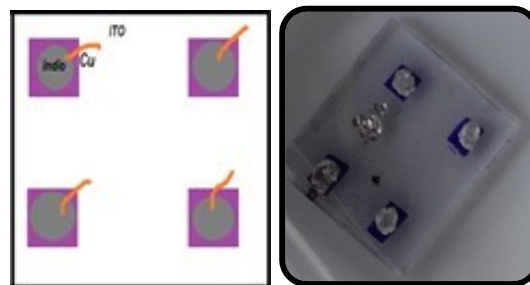


Figura 1: Capacitores diseñados. Izq: Esquema del capacitor. Der: Vista superior del dispositivo.

El depósito de la RPF sobre la lámina se realizó con un pincel y luego se empleó la técnica *spin*

coating con una velocidad de giro de 6000 rpm y aceleración de 20 rpm/min. Con ello se logró obtener una película uniforme de RPF.

Posteriormente, se aplicó un tratamiento térmico (Zapata, 2016) a una temperatura de 50 °C por 30 minutos para mejorar la adherencia de la resina al ITO. La fotolitografía se utilizó para definir el área del capacitor, exponiendo la resina a luz UV por 2 minutos a través de una máscara de aluminio y revelándola con una solución química proporcionada por el fabricante.

La constante dieléctrica de la RPF se determinó midiendo la capacitancia del dispositivo con un circuito RC. Se utilizó un generador de señales para cargar y descargar el capacitor, mientras que un osciloscopio registró la constante de tiempo, permitiendo calcular la capacitancia. Se obtuvo una constante de tiempo $\tau = 96[\mu s]$.

Las dimensiones de los contactos fueron medidas con las capturas fotográficas de un microscopio metalográfico. Se midió un largo $l = 1,44 [mm]$ y ancho $w = 0,97 [mm]$ con un programa de medición de dimensiones desarrollado en el LAFISO y el espesor de la capa dieléctrica se obtuvo mediante las técnicas inclusión y pulido, cuya medición fue $d = 8,31[\mu m]$.

Empleando las ecuaciones (1) y (2) se obtuvo la constante dieléctrica relativa ϵ del RPF:

$$C = \frac{\tau}{R} = 28,8[pF] \quad (1)$$

$$\epsilon_{RPF} = \frac{C d}{\epsilon_0 A} = 19,3 \quad (2)$$

Fabricación de los transistores de efecto de campo

Los FETs fueron fabricados a partir de láminas delgadas de ZnO sobre un sustrato de Si (ZnO/Si) y BaSnO₃ sobre un sustrato de SrTiO₃ (BSO/STO) (Sanchela et al., 2017). Dichos films poseen espesores de 100 [nm] aproximadamente. Con el propósito de mejorar el control de la compuerta se implementó *etching* químico (Villarroya, 2005) para definir un canal delgado de aproximadamente 1[mm] en la película semiconductora (ver Fig. 2):



Figura 2: Canal definido por el *etching* químico.

El proceso de fabricación inició con el depósito del RPF mediante *spin coating*, seguida de tratamiento térmico para mejorar la calidad de la interfase entre el RPF y el semiconductor.

La geometría del canal fue definida mediante fotolitografía (Gray et al., 2017) y *etching* químico, empleando una solución selectiva para cada material. Para el ZnO se utilizó un volumen de 1ml de ácido ortofosfórico en 25 ml de agua destilada y para el BSO se utilizó 7,5 ml de ácido fluorhídrico en ese mismo volumen de agua destilada (Lee et al., 2024). Las láminas se sumergieron, en sus correspondientes soluciones ácidas durante 2 segundos y 30 segundos, respectivamente. Los contactos eléctricos de drenador, compuerta y fuente fueron realizados con indio (In) e hilos de oro (Au), asegurando con ello una baja resistencia de contacto.

Caracterización eléctrica de las láminas ZnO/Si

Se realizaron mediciones de corriente de drenaje (I_{DS}) en función de la tensión de drenaje (V_{DS}) para diferentes valores de tensión de compuerta (V_{GS}), que variaban entre 0V y 20V. Los experimentos se llevaron a cabo empleando una fuente de tensión programable, un nanovoltímetro Keithley 2260B-80-1, y una resistencia patrón para tomar mediciones indirectas de corriente.

Las curvas obtenidas fueron ajustadas a la ecuación característica de un MOSFET (Ec. 3), lo que permitió determinar la movilidad electrónica (μ) (Ec. 4) y la tensión de umbral (V_{th}) de cada dispositivo.

$$I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{\beta}{2}V_{DS}^2 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu W \epsilon_{RPF}}{L d} \quad (4)$$

Donde: L es el largo del canal, W es el ancho del canal, d es el espesor del dieléctrico y β es un parámetro de fabricación.

Para el ZnO se utilizaron dos láminas diferentes fabricadas con distintos parámetros de crecimiento, denominadas láminas A y B. Ambas se crecieron a una presión de oxígeno de $1\text{E-}3$ [mTorr], aunque existieron ligeras diferencias en dicha condición, como también en el espesor de las películas, a factores geométricos y a la fluencia del láser utilizada, que fue superior a 2 [J/cm²]. De esta manera, la lámina A presenta una mayor resistencia de canal entre drenador y fuente (R_{DS}) que la lámina B.

Para la lámina A se obtuvo la curva de la Fig. 3:

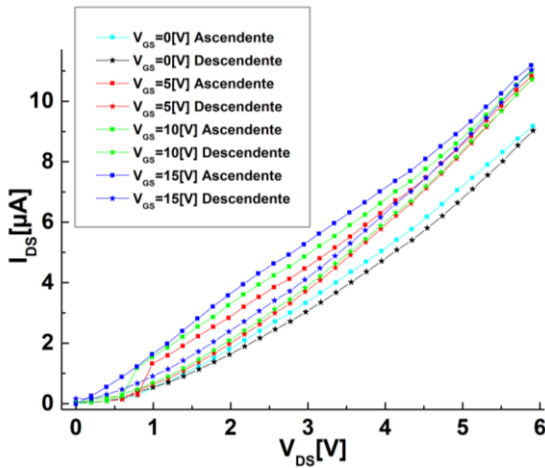


Figura 3: Curvas I-V con $V_{GS} > 0$ [V].

Se observa un correcto comportamiento de I_{DS} con variaciones de V_{GS} , verificando el comportamiento de un FET. Sin embargo, las curvas resultaron parabólicas con concavidad positiva, lo cual no corresponde al comportamiento de un MOSFET. Se decidió extender el rango de V_{DS} para identificar la zona de saturación, pero fue sin éxito, ya que la corriente seguía incrementando para V_{DS} mayores. Además, pudo observarse que las curvas para V_{GS} descendentes, tendían a encontrarse por debajo de las ascendentes. En la sección de Resultados se explica el motivo de este comportamiento.

A la lámina B se le aplicó el mismo ensayo sin emplear tratamiento térmico y se obtuvo lo siguiente (ver Fig. 4):

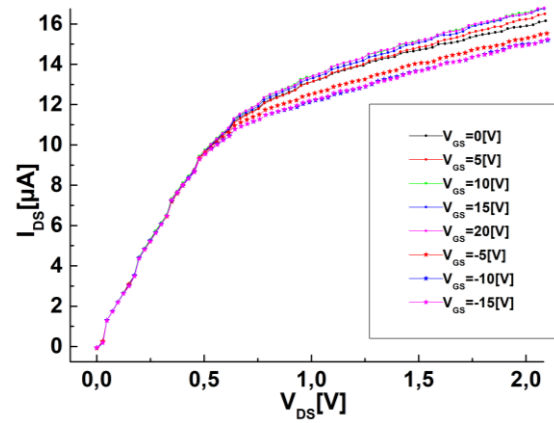


Figura 4: Curvas I-V sin tratamiento térmico.

Se observa que la lámina presentaba el comportamiento de un MOSFET para diferentes tensiones de V_{GS} lográndose identificar la zona de saturación y la zona óhmica del dispositivo.

Luego se aplicó tratamiento térmico y se obtuvo lo siguiente (ver Fig. 5):

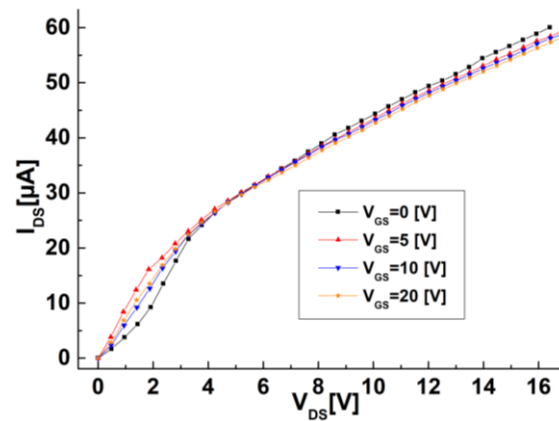


Figura 5: Curvas I-V con tratamiento térmico.

Se observa que las curvas no varían para diferentes V_{GS} . Se realizaron ajustes con un polinomio de 2º, Ec. (5), para relacionarlas con la Ec. (3) de un MOSFET. Se ajustan en un rango corto de V_{DS} (0 a 6 v) y en un rango largo de V_{DS} (0 a 20v). Los parámetros b_1 , b_2 y b_3 se modificaban manual o automáticamente para encontrar el mejor ajuste.

$$y = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2 \quad (5)$$

Las curvas medidas no ajustaron correctamente con la Ec. (5) como era de

esperarse. Sin embargo, se tomaron los parámetros obtenidos considerando las Ec. (6), (7) y (8), los cuales se volcaron en la Tabla 1.

$$\beta = b_3 \cdot 2 \quad (6)$$

$$V_{th} = V_{GS} - \frac{b_2}{\beta} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\beta L d}{W \varepsilon_{RPF}} \quad (8)$$

Tabla 1: Resultados de los ajustes cuadráticos, en rango corto de V_{DS} (0[V] a 6[V]) y en un rango largo de V_{DS} (0[V] a 20[V]).

V_{GS} [V]	β [$\frac{A}{V^2}$]	V_{th} [V]	μ [$\frac{m^2}{V.s}$]	Ajuste
0	3.26E-7	-19	2.08E-3	Largo
5	2.94E-7	-15.40	1.88E-3	Largo
5	8.67E-7	-4.5	5.55E-3	Corto
10	2.86E-7	-10.65	1.83E-3	Largo
10	7.11E-7	-0.7	4.55E-3	Corto
20	2.36E-7	-2.98	1.51E-3	Largo
20	1E-6	11.65	6.41E-3	Corto

Al observar la Tabla 1 se destaca que la movilidad es coherente con los valores experimentales reportados para el ZnO (Acovic, Larosa y Sun, 1996), el parámetro β es constante y se obtiene un V_{th} negativo pero variable. Al observar que la tensión V_{GS} no tiene efecto sobre las curvas, se concluyó que el V_{th} del dispositivo es el que se obtiene para $V_{gs} = 0$ [V]. Esto es porque se debe recordar que el V_{th} se calcula con la Ec. 7. En esta ecuación el V_{GS} siempre resulta nulo por lo que se mencionó anteriormente. La justificación teórica de esta decisión se verá con más detalle en la sección de Resultados.

Para mejorar la correlación de los ajustes se realizaron ajustes con un polinomio de 3º, Ec. (9).

$$y = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x^3 \quad (9)$$

Se puede observar en la Fig. 6 que el ajuste mejoró.

Si bien la Ec. (9) no se aproxima a la ecuación I_{DS} de un MOSFET, consideramos que el término cúbico es quien afecta nuestra aproximación a dicha ecuación y que tiene un significado físico. Por lo tanto, a partir de los parámetros de los ajustes, se construyó la siguiente Tabla 2:

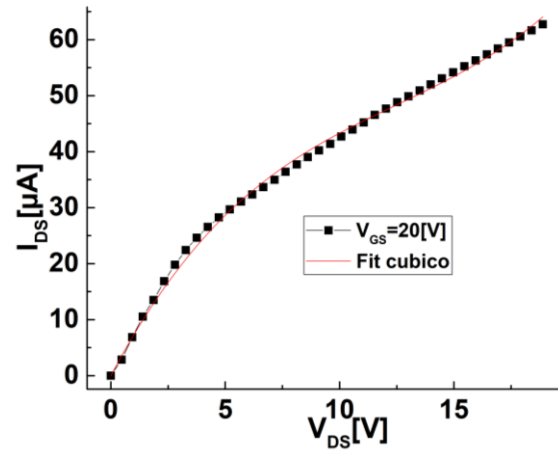


Figura 6: Ajuste cúbico para $V_{GS} = 20$ [V].

Tabla 2: Resultados de los ajustes cúbicos.

V_{GS} [V]	β [$\frac{A}{V^2}$]	V_{th} [V]	μ [$\frac{m^2}{V.s}$]
0	7.39E-7	-9.76	4.79E-3
5	9.71E-7	-3.23	6.29E-3
10	8.53E-7	1.13	5.53E-3
20	9.27E-7	11.67	6.01E-3

A partir de la Tabla 2 se obtiene la movilidad que posee el FET $\mu = 47,9$ [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] y la tensión de umbral $V_{th} = -9,8$ [V]. Los valores resultantes son comparables con los reportados en la literatura (Borysiewicz, 2019), validando su funcionamiento como FET.

Para justificar el término cúbico, se consideró que la corriente I_{DS} es afectada por una corriente que circula en el sustrato de Silicio. Esto es debido a que el sustrato no es totalmente un aislante y por ende forma una juntura con el ZnO. Por lo tanto, se pudo estimar que en nuestro FET hay una corriente adicional causada por la juntura ZnO/Si. Dicha corriente fue ajustada con la Ec. (10), corresponde a la corriente directa de un diodo (Millman y Halkias, 1983).

$$I_{DS} = I_s e^{\frac{V_{DS}}{\eta V_T}} \quad (10)$$

Donde: I_s la corriente de saturación inversa, V_T es la tensión térmica de la juntura, K es la constante de Boltzmann, T la temperatura, q la carga elemental del electrón y η es un factor de corrección de la corriente.

Esta ecuación fue correlacionada con el coeficiente cubico b_4 de la curva con $V_{GS} =$

20[V]. Para ello se graficó el coeficiente cúbico en función de V_{DS} con la Ec. (11):

$$y = b_4 V_{DS}^3 \quad (11)$$

Luego de graficar la Ec. (11), la misma fue ajustada con la Ec. (12) como se observa en la Fig. 7:

$$y = y_0 + A e^{\frac{-x}{\tau}} \quad (12)$$

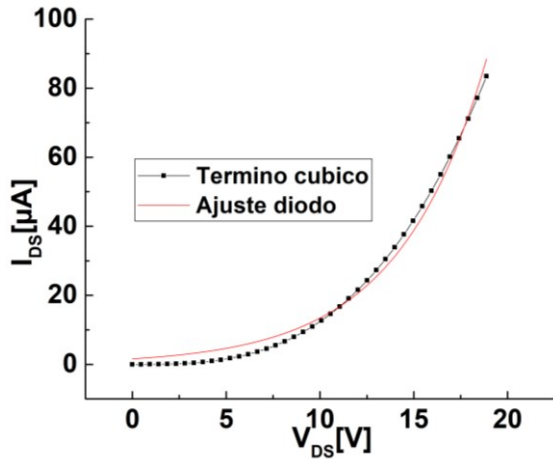


Figura 7: Ajuste del coeficiente cúbico.

A partir de este ajuste se obtuvo $\tau = 5,7[V]$ y al relacionar las Ec. 10-12, se obtiene:

$$\eta = \frac{\tau}{V_T} = \frac{\tau q}{KT} = 218,7$$

Este valor de η confirma que el término cúbico incorporado en el modelo puede interpretarse como una contribución asociada a la juntura ZnO/Si.

Análisis eléctrico de la lámina BSO/STO

Ahora, para el caso de BaSnO_3 se obtuvieron las curvas de la Fig. 8.

Se observa en la Fig. 8 que las curvas descienden para valores positivos de V_{GS} . Para comprobar de otra forma el funcionamiento del FET, se llevó a cabo un análisis de R_{DS} para observar si la resistencia de la lámina cambiaba para diferentes valores de V_{GS} manteniendo un V_{DS} constante (Fig. 9).

Puede observarse q la resistencia de la lámina se comporta como la de un FET, ya que $R_{DS} \propto V_{GS}^{-1}$. Pero también se aprecia que su resistencia asciende constantemente lo cual no resulta algo usual para este tipo de dispositivos. Consideramos que este efecto ascendente

resta a las curvas y esto provoca que las curvas I_{DS} vs V_{DS} no respondan de forma correcta a diferentes tensiones de V_{GS} .

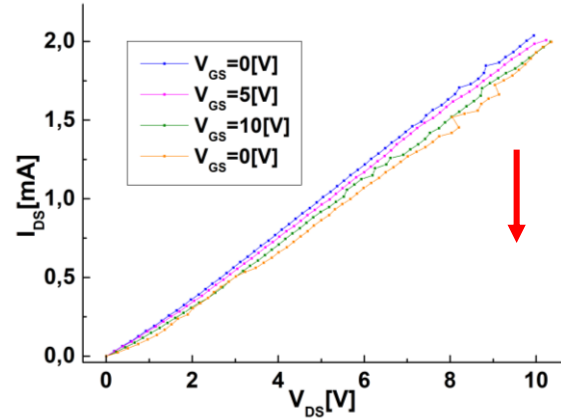


Figura 8: Curvas I-V del BSO con tratamiento térmico.

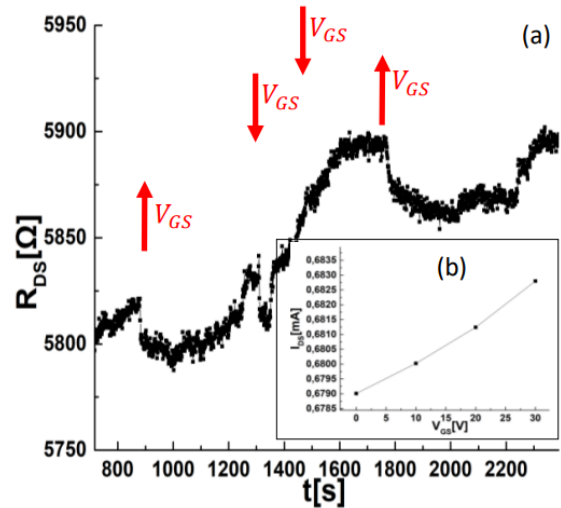


Figura 9: Análisis de resistencia del canal. (a) Ensayo eléctrico de R_{DS} en función del tiempo. (b) Inset: Curva I_{DS} vs V_{GS} con $V_{DS} = 4 [V]$.

Se graficó la corriente I_{DS} en función de V_{GS} a partir de la curva anterior como se observa en la Fig. 9. Aquí la corriente I_{DS} tiende a ascender en los momentos en que se incrementa la tensión V_{GS} , lo cual corresponde al comportamiento de un FET al considerar su curva I_{DS} vs. V_{GS} . Por lo tanto, los resultados muestran una respuesta no completamente satisfactoria, pero se aprecia que la resistencia R_{DS} del canal responde correctamente al comportamiento de un FET, sugiriendo la

necesidad de optimizar el proceso de fabricación.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en función de la caracterización dieléctrica de la resina polimérica fotosensible (RPF), la fabricación de los transistores de efecto de campo (FET) y su análisis eléctrico.

En la caracterización de la RPF, se obtuvo una constante dieléctrica de $\epsilon \approx 19,3$ determinada mediante mediciones de capacitancia en un circuito RC. La técnica de *spin coating* permitió obtener capas uniformes con espesores en el rango de 5 – 10 $[\mu\text{m}]$, verificadas mediante microscopía metalográfica.

Los transistores fabricados con ZnO y BaSnO_3 presentaron diferencias significativas en su respuesta eléctrica. En el caso del ZnO, la lámina B presentó curvas $I_{DS}-V_{DS}$ que mostraron una clara modulación de corriente al aplicar diferentes voltajes de compuerta, permitiendo obtener una movilidad de $\mu \approx 47,9 [\text{cm}^2/\text{Vs}]$ y una tensión de umbral de $V_{th} \approx -9,8 [\text{V}]$, valores comparables con la literatura.

Discusión

Para la lámina A, se observó una clara influencia del efecto de campo de la compuerta a pesar de la ausencia de un tratamiento térmico previo. Este hecho puede atribuirse a la elevada resistencia del canal, que limita la densidad de corriente y reduce significativamente la generación de portadores calientes (Acovic, Larosa y Sun, 1996). La disminución en la inyección de portadores en el dieléctrico minimiza su efecto en las características eléctricas del dispositivo. Las curvas I-V observadas sugiere que el efecto de inyección podría estar presente especialmente en la región de corriente decreciente.

Para el BaSnO_3 , se examinó que la resistencia del canal R_{DS} del dispositivo respondía correctamente a diferentes V_{GS} . Se contempló una variabilidad en la respuesta eléctrica, lo cual puede deberse al efecto de Inyección de Portadores Calientes en la RPF. Como la muestra posee un R_{DS} bajo, esto permite que circule una mayor corriente I_{DS} y por lo tanto aumente el número de portadores calientes. Algunos de estos portadores, que contribuyen a la corriente I_{DS} , poseen mucha energía por el

campo eléctrico aplicado entre Drenador y Fuente y quedan atrapados en la RPF, causando que la resistencia R_{DS} aumente y por lo tanto no sea posible apreciar una variación de las curvas ante diferentes V_{GS} . Ello sugiere que el proceso de fabricación aún requiere ajustes para garantizar un funcionamiento óptimo del dispositivo.

El desempeño del ZnO como canal semiconductor en los FETs coincide con lo reportado en estudios previos, evidenciando su capacidad para operar de manera estable en estructuras experimentales con dieléctricos alternativos. El ajuste de los parámetros eléctricos a modelos MOSFET confirma que la RPF puede emplearse como dieléctrico de compuerta, aunque su influencia en la movilidad de portadores debe ser analizada con mayor profundidad.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el BaSnO_3 evidencian que su integración en dispositivos electrónicos sigue siendo un desafío. Se sugiere optimizar las condiciones de fabricación del semiconductor y mejorar las técnicas de diseño para reducir imperfecciones que afecten la conducción eléctrica.

El uso de RPF en litografía óptica de bajo costo demuestra ser una alternativa viable para la fabricación de dispositivos, alcanzando resoluciones en el orden de los cientos de nanómetros. Sin embargo, su estabilidad a largo plazo y su compatibilidad con diferentes semiconductores requieren estudios adicionales para evaluar su aplicabilidad en tecnologías más avanzadas.

Conclusiones

Este trabajo presenta la fabricación y caracterización de FETs empleando una RPF como dieléctrico de compuerta. Ello se logró, íntegramente por primera vez, en el Laboratorio de Física del Sólido (LAFISO - FACET/UNT), mediante varios procesos avanzados de micro fabricación. Los principales hallazgos fueron:

- Se determinó experimentalmente que la RPF presenta propiedades dieléctricas adecuadas y es compatible con técnicas de fotolitografía, *spin coating*, tratamiento térmico y *etching* químico en la fabricación de dispositivos electrónicos.
- Los FETs basados en ZnO exhibieron un comportamiento acorde con la teoría, lo que permitió extraer parámetros eléctricos clave

como la movilidad electrónica y la tensión de umbral.

- En el caso del BaSnO_3 , se logró observar su funcionamiento como un FET, pero no fue posible caracterizarlo completamente debido a limitaciones en el proceso de su fabricación y diseño como FET.

Estos resultados sugieren que la RPF es una alternativa viable para su uso como dieléctrico en dispositivos electrónicos experimentales, aunque se requieren optimizaciones en la fabricación para garantizar su desempeño en distintas configuraciones de semiconductores

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología por el acceso a sus instalaciones y recursos que hicieron posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acovic, A., Larosa, G. & Sun, Y.C. (1996). "A review of hot-carrier degradation mechanisms in MOSFETs". *Microelectron. Reliab.*, Vol. 36. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(96\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0026-2714(96)00022-4)

Aggoune, W., Eljarrat, A., Nabok, D. et al. (2022). "A consistent picture of excitations in cubic BaSnO_3 revealed by combining theory and experiment". *Communications Materials*. <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00234-6>

Borysiewicz, M.A. (2019). "ZnO as a Functional Material, a Review". *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.

Choi, J. & Yoo, H. (2023). "Combination of Polymer Gate Dielectric and Two-Dimensional Semiconductor for Emerging Field-Effect Transistors". *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym15061395>

Figueroa, C.A., et al. (2021). "The role of polarization in the threshold voltage of field effect transistors based on ZnO/MgO ". *Appl. Phys. Lett.* <https://doi.org/10.1063/5.0065968>

Gray, P.R., et al. (2017). *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. University of California. 5th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Estados Unidos.

Hyung, K. et al. (2012). "High mobility in a stable transparent perovskite oxide". *Applied Physics Express*, 5(6), 061102. <https://doi.org/10.1143/APEX.5.061102>.

Lee, J. et al. (2024). "Micron-scale FETs of fully epitaxial perovskite oxides using chemical etching". *Materials Today Quantum*. <https://doi.org/10.1016/j.mtquan.2024.100002>

Millman, J. & Halkias, C.C. (1983). *Electrónica Integrada: Circuitos y Sistemas Analógicos y Digitales*. Columbia University. Editorial Hispano Europea, Barcelona, España.

Özgür, Ü. & Morkoç, H. (2009). *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KaA.

Sanchela, A.V. et al. (2017). "Thermopower modulation clarification of the intrinsic effective mass in transparent oxide semiconductor BaSnO_3 ". *Phys. Rev. Materials*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.034603>

Villarroya, M. (2005). "Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores biológicos con palancas como elementos transductores". Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.

Zapata, M.C. (2016). "Fabricación y Caracterización de nano y microestructuras de óxidos semiconductores". Tesis doctoral. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.

Este trabajo representa un resumen del Trabajo de Graduación del Ingeniero Electrónico Balthazar Martín, defendido en diciembre de 2024, en la FACET-UNT.

AUTORES

MARTÍN, Balthazar

Ingeniero Electrónico (2024). Docente Auxiliar de 2^{da} Categoría Catedra Materiales Eléctricos, Dispositivos Electrónicos Y Materiales y Dispositivos Electrónicos en el DEEC. Operador Técnico y Responsable de Área Laboratorio de Instrumentación Industrial, Red INTI-SAC, FACET.

balthazarm8@gmail.com. ORCID  0009-0004-3881-5536

ZAPATA, Cecilia

Bachiller Universitario en Física, Ingeniera Electrónica, Dra. en Ciencias Exactas e Ingeniería, títulos obtenidos en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología FACET - UNT. Profesora Adjunta con dedicación exclusiva en el Dpto. de Física de la FACET. Investigadora categoría IV.

czapata@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0009-0008-3610-6989

FIGUEROA, Cristian

Ingeniero Electrónico. Profesor Asociado con dedicación exclusiva en la Cátedra de Materiales Eléctricos, Dispositivos Electrónicos y Materiales y Dispositivos Electrónicos en el Departamento Eléctrica, Electrónica y en Computación de la FACET - UNT. Estudiante Avanzado de Posgrado, Actualmente escribiendo el manuscrito de la tesis, para obtener el título de Doctor de la carrera del Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería de la UNT.

cafigueroa@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0009-0000-1091-0962

BRIDOUX, Germán

Dr. en Físico, investigador del CONICET adscripto al Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFIOA-CONICET-UNT). Docente en el Laboratorio de Física Experimental I y II de la FACET. Se ha especializado en el estudio de materiales condensados, particularmente películas delgadas y nanoestructuras de óxidos, explorando fenómenos como la transición metal-aislante, transporte eléctrico y térmico, ferromagnetismo y orden de carga, bajo condiciones de temperatura, campo eléctrico y estructura de las muestras.

gbridoux@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-0505-9613

VILLAFUERTE, Manuel

Licenciado en Física de la FACET - UNT, magister en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional De Gral. San Martín. Doctor en Física de la FACET - UNT. Prof. Titular Dedicación Exclusiva en el Departamento. de Física de la FACET-UNT. Investigador Independiente de CONICET. Responsable del Laboratorio de Física del Sólido y del laboratorio de Física Experimental I y II.

mvillafuerte@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-1799-0595

JIMENEZ, Gustavo

Personal de Apoyo en INFIOA-CONICET-UNT. Desarrollo de electrónica.

gejimenez@gmail.com

Efecto de la polilisina y N-acetilcisteína sobre mantas de policaprolactona en cultivo celular

BUSI, Aldana ¹; ARGANARAZ AYBAR, Julio ⁴; KOZUSZKO, Silvia ¹
MONSALVE, Leandro ³; RODRIGUEZ, Andrea ^{1,2}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Bioingeniería.

² Instituto Superior de Investigaciones Biológicas (INSIBIO), Universidad Nacional de Tucumán - CONICET.

³ INTI Textiles, Av. General Paz 5445, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia.

Resumen

El objetivo del trabajo fue desarrollar y evaluar la eficacia de scaffolds de policaprolactona (PCL) con sustancia antioxidante en cultivo primario de glóbulos blancos, que promueven la formación de cicatrices gliales. Se utilizaron scaffolds de fibras paralelas de PCL mediante electrospinning, biofuncionalizados con polilisina (P) y N-acetilcisteína (NAC) para controlar la adhesión y proliferación celular. Estos fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido, ángulo de contacto y en cultivo celular primario. Los resultados mostraron que los scaffolds funcionalizados con P favorecieron la adhesión y proliferación de células inflamatorias, mientras que aquellos con P y NAC las redujeron.

Palabras clave: Ingeniería de tejidos, Sustancias antiinflamatorias, Tratamientos superficiales.

Effect of polylysine and N-acetylcysteine on polycaprolactone mats in cell culture

Abstract

The objective of this work is to develop and evaluate the efficacy of polycaprolactone (PCL) scaffolds with antioxidant substances in primary white blood cells cultures, which promote the formation of glial scars. Electrospun PCL scaffolds of parallel fibers were used and biofunctionalized with polylysine (P) and N-acetylcysteine (NAC) to control cell adhesion and proliferation. They were characterized by scanning electron microscopy, contact angle measurements and primary cell cultures. Results showed that scaffolds functionalized with P favored the adhesion and proliferation of inflammatory cells, while those with P and NAC reduced them.

Keywords: Tissue engineering, Anti-inflammatory substances, Surface treatments.

Introducción

Este trabajo surge de la intersección de dos campos de estudio: la Bioingeniería y la Ingeniería de Tejidos, con un propósito significativo: mejorar la calidad de vida de las

personas. El objetivo central de esta investigación es aplicar principios de ingeniería y ciencias de la vida para avanzar y contribuir en la búsqueda de soluciones a un problema patológico que hasta ahora ha presentado

opciones de tratamiento muy limitadas: las lesiones medulares.

La lesión de la médula espinal (LM) representa un importante problema de salud que puede conducir a discapacidades temporales o permanentes, así como a múltiples complicaciones secundarias, Talac et al. (2004). Las secuelas de una LM son devastadoras, provocando déficits neurológicos de larga duración que afectan al sistema nervioso motor, sensorial y autónomo por debajo del nivel de la lesión. Además, estas secuelas conllevan enormes cargas psicológicas, sociales y económicas.

La fisiopatología de la LM implica procesos primarios y secundarios que ocurren desde el momento de la lesión hasta dos años después, Ballesteros et al. (2012). En el área afectada se forma una cicatriz glial, que se compone de macrófagos que se originan en la médula ósea y se acumulan en el centro del tejido dañado. Los astrocitos y microglías residentes se localizan en el borde de la lesión, formando una barrera que inhibe la regeneración axonal funcional, Ren et al (2014); Orr y Gensel (2018). La inhibición del crecimiento por parte de la cicatriz glial se considera el mayor obstáculo para la regeneración neuronal. Además, estos procesos indican que la LM no es estática, ya que pueden surgir disfunciones neurológicas secundarias, como la formación de quistes y siringes, que se desarrollan durante la maduración de la lesión, Ren et al (2014).

El tratamiento de la LM, basado en el conocimiento actual de los mecanismos de lesión, ha buscado desarrollar intervenciones terapéuticas tempranas que mitiguen los efectos de estos mecanismos fisiopatológicos secundarios. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha identificado ninguna intervención significativa.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la eficacia de scaffolds poliméricos, fabricados mediante electrospinning y funcionalizados con una sustancia antiinflamatoria, en la reducción de células inflamatorias en cultivos celulares primarios de sangre, así como caracterizar físicamente dichos scaffolds. Para el análisis, se cultivaron glóbulos blancos polimorfonucleares (PMN) y mononucleares (MN) de forma aislada y sobre diferentes

scaffolds: policaprolactona (PCL), PCL con polilisina (PCL-P) y PCL con polilisina y N-acetilcisteína (PCL-P-NAC). La evaluación se llevó a cabo mediante tinción con colorante Giemsa, lo que permitió visualizar la distribución y morfología de las células adheridas. Posteriormente, se realizó un recuento manual para obtener datos cuantitativos sobre la cantidad de células adheridas a las superficies. Finalmente, se evaluó la viabilidad y citotoxicidad celular mediante un ensayo con XTT.

Materiales y métodos

Fabricación de scaffolds

Los scaffolds utilizados en este estudio fueron fabricados en el Centro de Textiles del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) utilizando un equipo de electrospinning Y-flow electrospinner 2.2, D-500, según lo descrito por Molinari et al. (2018). Se preparó una solución de policaprolactona (PCL) con un peso molecular de 80,000 (Sigma-Aldrich) al 18% m/v para el proceso de electrospinning. Los parámetros utilizados fueron: distancia aguja-colector de 26 cm; velocidad de flujo de la solución de 1 ml/h; y un colector de tambor rotatorio a 500 rpm para producir fibras alineadas. La configuración incluyó dos fuentes de alto voltaje: una en la aguja, entre +6 y +12 kV, y otra en el colector, entre -15 y -17 kV. Los parámetros ambientales se controlaron durante todo el procedimiento.

Modificación superficial de scaffolds

Los scaffolds fueron modificados según lo descrito en la Figura 1.

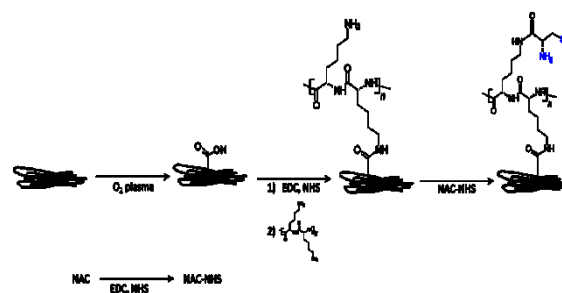


Figura 1: Pasos de funcionalización de los scaffolds de PCL electrohilados.

Tratamiento con plasma de oxígeno: las muestras fueron tratadas con plasma de oxígeno para aumentar su hidrofilicidad y generar grupos funcionales para el anclaje covalente de la P y la NAC. Se utilizó un equipo Diener del INTI bajo las siguientes condiciones: presión de 0,8 mBar, flujo de oxígeno de 10 sccm, tiempo de tratamiento de 1 minuto y temperatura de 20°C.

Inmovilización de P y NAC: se utilizó EDC 0,1 M (N-(3-Dimethylaminopropyl)-N-ethylcarbodiimide), NHS 25 mM (N-Hydroxysuccinimide) y PBS (Solución salina tamponada con fosfato). Por su parte, los scaffolds de PCL con Polilisina y N-Acetilcisteína (PCL-P-NAC) se fabricaron inmovilizando covalentemente la NAC utilizando el método de carbodiimida según Garate et al. (2018). Se empleó un espaciador de polilisina y se realizó la oxidación utilizando EDC y NHS.

Caracterización fisicoquímica

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología de los scaffolds y el diámetro de las fibras en los diferentes grupos se analizaron mediante observaciones con Microscopía Electrónica de Barrido. Se realizaron mediciones de fibras seleccionadas de manera aleatoria utilizando un equipo FEI QUANTA 250, ubicado en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Los grupos evaluados fueron: PCL, PCL-P y PCL-P-NAC tratados con tratamiento de plasma.

Humectabilidad: medición del ángulo de contacto

La evaluación del ángulo de contacto se llevó a cabo mediante el análisis del contorno de la gota en condiciones ambientales normales. La forma de la gota fue examinada ópticamente, según se describe en el estudio de Felice (2017). Para capturar las imágenes, se utilizó la cámara de un teléfono Samsung A12 con una resolución de 48 MP, colocada a una distancia focal de 28 mm. Los scaffolds se colocaron sobre una superficie plana iluminada con una bombilla incandescente de 40W y un difusor de luz de papel finlandés, posicionados entre la muestra y la cámara.

Se aplicó una gota de agua destilada (10 µL) sobre la superficie de cada muestra y se

capturaron las imágenes después de un intervalo de 10 segundos. Posteriormente, las imágenes fueron procesadas utilizando el software Image J para medir el ángulo de contacto. Se realizó un análisis estadístico para verificar diferencias significativas entre las muestras, utilizando el software InfoStat mediante el Método de Tukey con un nivel de significación "p" de 0,05. Se evaluaron tres especímenes de cada uno de los grupos tratados con plasma (PCL, PCL-P y PCL-P-NAC) y se incluyó un grupo de PCL sin tratamiento de plasma como grupo control.

Cultivo celular

Para el diseño de los scaffolds para cultivo celular, se incorporó un soporte de polietilentereftalato (PET) de 0,125 mm de espesor sobre el tambor rotatorio del electrospinning, lo cual facilitó la manipulación y redujo el riesgo de daño y el consumo de reactivos. Las fibras de PCL se recolectaron en láminas de PET y se cortaron con un plotter de corte láser de CO₂ a las dimensiones necesarias para las placas de cultivo. Los scaffolds fueron esterilizados sumergiéndolos en etanol al 70% durante 20 minutos, seguidos de exposición a radiación ultravioleta (UV) durante 15 minutos por lado, y finalmente secados a temperatura ambiente en una Cámara de Seguridad Biológica Clase II/A-B3.

Los Leucocitos se obtuvieron a partir de sangre periférica recolectada por punción venosa de un donante sano. Mediante la técnica de Ficoll Hypaque y centrifugación, se formaron capas de eritrocitos con polimorfonucleares, Ficoll, mononucleares y plasma. Se recolectaron las células MN y PMN de las capas correspondientes. Los eritrocitos remanentes se eliminaron por lisis osmótica con agua destilada estéril en frío. Ambos tipos celulares se cultivaron en medio RPMI 1640-HEPES y suero fetal bovino. La densidad celular se determinó utilizando Trypan Blue Stain (0,4%) y una cámara de Neubauer, obteniéndose $4,5 \times 10^6$ células/ml para MN y $1,96 \times 10^7$ células/ml para PMN.

Los glóbulos blancos se cultivaron en placas de 24 pocillos con los diferentes grupos de estudio, agregando la misma cantidad de células por pocillo para cada tipo celular: 0,5 ml para MN y

1 ml para PMN. Las placas se incubaron a 37,5°C durante 1 hora en una incubadora de CO₂ Heal Force, y las células se fijaron con 3 gotas de metanol por pocillo, permitiendo una exposición de 3 minutos antes de retirar el metanol.

Tres muestras de cada grupo fueron utilizadas para el cultivo de PMN y dos para MN. Los grupos experimentales incluyeron: PCL, PCL-P y PCL-P-NAC tratados con plasma de oxígeno. Adicionalmente, se incluyó un grupo control donde las células se cultivaron directamente sobre las placas de cultivo.

Tinción

Para lograr una visualización más clara de las células adheridas en los distintos grupos de estudio, así como de su distribución y morfología, se realizó la tinción de las muestras con el Colorante Giemsa. Se utilizó una dilución de 1 en 10 con agua destilada y se dejaron las muestras en contacto con la solución durante 15 minutos. Las imágenes de los diversos grupos de estudio se capturaron utilizando un microscopio invertido y el software ToupView, con magnificaciones de 10X y 40X.

Evaluación de la adherencia celular

Para evaluar la adherencia de células sobre los diferentes grupos de estudio, se realizó un conteo utilizando microfotografías adquiridas con un microscopio invertido a 10X con tinción Giemsa. El conteo se efectuó manualmente en un área de observación uniforme en todas las imágenes, empleando el software Image J. Las imágenes se dividieron en nueve cuadrantes, y se seleccionaron tres (superior izquierdo, centro, inferior derecho) para el conteo. Se calculó un promedio de los valores obtenidos para comparar la adhesión celular entre los grupos. Las diferencias significativas se verificaron mediante análisis estadístico con el Test de Tukey con un nivel de significación $p > 0.05$, utilizando el software InfoStat.

Ensayo de viabilidad celular

Para evaluar la viabilidad celular, se cultivaron glóbulos blancos sobre los scaffolds en microplacas de 96 pocillos utilizando el colorante XTT (3'-[1-(fenilamino carbonil)-3,4-tetrazolio]-bis(4-metoxi-6-nitro) bencenosulfónico hidrato de sodio). Se extrajo sangre humana y se separaron los glóbulos blancos mediante centrifugación para

prepararlos para el cultivo. Se sembraron 5×10^4 glóbulos blancos por pocillo y se añadieron 50 µl de XTT en cada pocillo. La placa se incubó a 37°C durante 1 hora y se midió la absorbancia del formazán formado a 450 nm usando un lector de microplacas (ELISA).

La viabilidad celular de cada tipo de scaffolds se determinó utilizando la fórmula (1), comparando con el grupo control en el que las células se cultivaron directamente sobre la placa de cultivo.

$$\text{Viabilidad} = (\text{media de la absorbancia del grupo experimental} / \text{media de la absorbancia del grupo control}) * 100\% \quad (1)$$

Se prepararon dos muestras de cada grupo: PCL, PCL-P y PCL-P-NAC tratados con plasma. Adicionalmente, se incluyó un grupo control donde las células se cultivaron directamente sobre la placa de cultivo y un grupo Blank que contenía únicamente medio de cultivo DMEM.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La morfología de los scaffolds y el diámetro de las fibras fueron evaluados mediante SEM a bajos y altos aumentos. Las imágenes obtenidas de este proceso se presentan en la Figura 2.

Los resultados del estudio evidenciaron la eficacia de utilizar un tambor rotatorio en el equipo de electrospinning para lograr una orientación alineada de las fibras. Se observó una gran cantidad de fibras, las cuales son homogéneas en diámetro y presentan una forma lineal y paralela, con superficie lisa. Además, los resultados mostraron que el diámetro promedio de las fibras electrohiladas es de aproximadamente 460 nm. Estas mediciones caen dentro de un rango adecuado para aplicaciones en ingeniería de tejido nervioso, ya que los diámetros de las fibras de la matriz extracelular suelen variar entre varios micrones y varios cientos de nanómetros, y los de los axones, entre 300 nm y 20 µm para la médula espinal humana, según lo reportado en la literatura por Li et al. (2022).

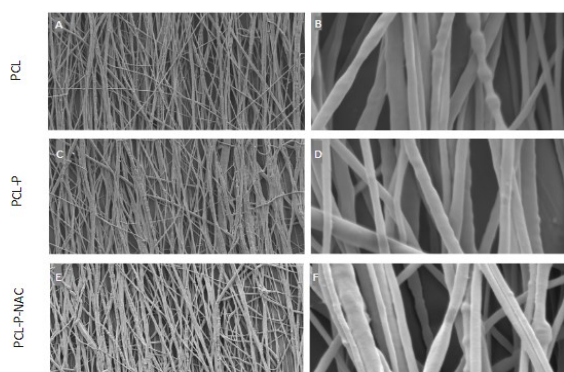


Figura 2: Microfotografías electrónicas de barrido mostrando la morfología de los scaffolds. Obsérvese claramente que las fibras son homogéneas en diámetro y se encuentran orientadas de manera paralela. A, C, E: 5.00 K X; B, D, F: 50.00 K X.

Humectabilidad: medición del ángulo de contacto

La Figura 3 ilustra las medias correspondientes a cada grupo de estudio junto con sus respectivas desviaciones estándar y su análisis estadístico.

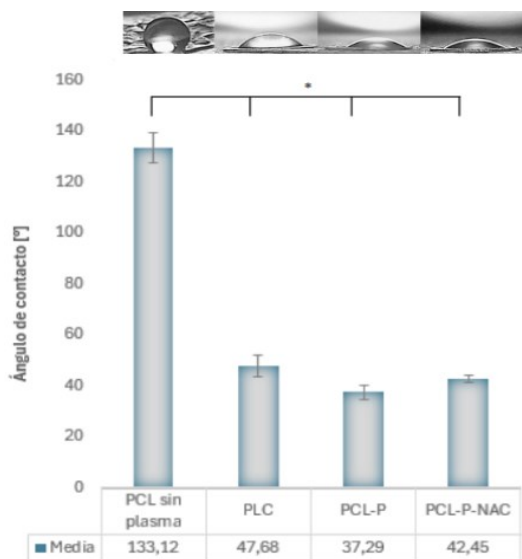


Figura 3: Medias de los ángulos de contactos de los diferentes grupos de estudio y sus desviaciones estándar. Los grupos PCL, PCL-P y PCL-P-NAC fueron tratados con plasma. Nota: La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05. Muestras con el símbolo * son significativamente diferentes entre sí.

En este ensayo, se analizó el impacto del tratamiento con plasma de oxígeno en diferentes grupos, evaluando cómo afecta a la hidrofiliicidad mediante la medición de los ángulos de contacto. La interpretación de estos resultados se basa en una clasificación convencional: un ángulo de 0° indica una completa humectación, ángulos entre 0° y 90° denotan una superficie mojable e hidrófila, ángulos entre 90° y 180° indican una superficie no mojable e hidrofóbica, y cuando el ángulo se acerca a 180° , la superficie se caracteriza como ultra hidrofóbica.

Los resultados muestran una marcada disminución en los ángulos de contacto de los grupos tratados con plasma en comparación con el grupo de control sin tratamiento, lo que evidencia una mejora significativa en la hidrofiliicidad de las superficies tratadas. Los valores del grupo de control se encuentran en el rango hidrofóbico, confirmando la naturaleza repelente a los líquidos de la PCL antes del tratamiento con plasma. La introducción de polilisina (P) y N-acetilcisteína (NAC) en los scaffolds resultó en ángulos de contacto aún menores, indicando un aumento notable en la mojabilidad de la superficie y sugiriendo un potencial interés en estas modificaciones para mejorar la capacidad de mojado en aplicaciones específicas.

El análisis estadístico de los resultados se complementa con la observación de la morfología de la gota. En superficies muy hidrofílicas, como en el caso de PCL-P y PCL-P-NAC, el agua tiende a dispersarse ampliamente. En cambio, en superficies hidrofóbicas, como el PCL sin plasma, la gota mantiene el menor contacto posible con la superficie.

Estos resultados respaldan la efectividad del tratamiento con plasma de oxígeno en la modificación de las propiedades de hidrofiliicidad de las superficies, con hallazgos similares a los reportados por Gibson et al. (2007) y Praveen et al. (2016). La mejora en la hidrofiliicidad influye directamente en la adhesión celular, un factor crucial para la regeneración de tejidos dañados.

Cultivo celular

Tinción

En las Figuras 4 y 5 se presentan las imágenes obtenidas mediante microscopio invertido, capturadas tanto a bajos como a altos aumentos.

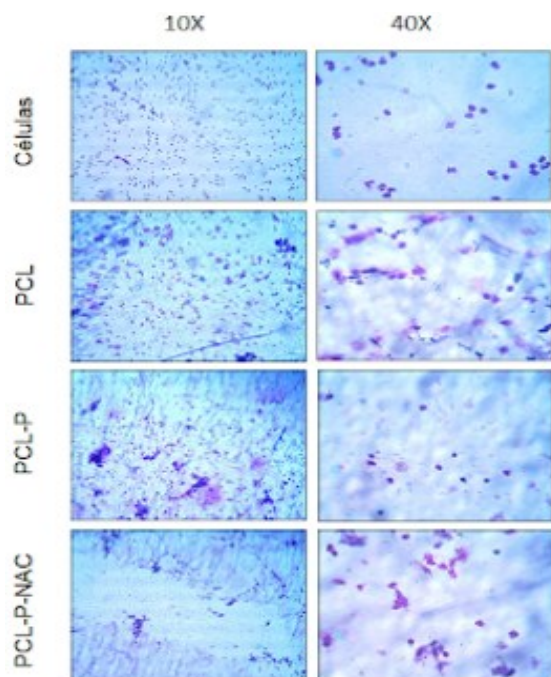


Figura 4: Microfotografías obtenidas del cultivo celular de células polimorfonucleares, capturadas a 10X y 40X, utilizando el colorante Giemsa.

Los resultados obtenidos al analizar la distribución celular en las imágenes capturadas a 10X revelaron varios aspectos importantes. En los cultivos con polimorfonucleares, principalmente neutrófilos, se observó cualitativamente un incremento en la cantidad de células en los grupos que contenían polilisina en comparación con aquellos que no la contenían. Esto sugiere que la polilisina mejora la adherencia y proliferación celular. Por otro lado, en los grupos con N-acetilcisteína, se evidenció una disminución en el número de células, posiblemente debido a las propiedades antiinflamatorias de la N-acetilcisteína sobre células proinflamatorias como los neutrófilos presentes en este grupo celular.

En el caso del cultivo con células MN, que incluyen monocitos y linfocitos, se observó un incremento en el número de células en los grupos con polilisina, similar a los resultados obtenidos con PMN. Sin embargo, los grupos

con N-acetilcisteína no mostraron una disminución considerable en el número de células, lo que podría indicar que los monocitos tienen características antiinflamatorias o proinflamatorias según el medio y las condiciones de cultivo.

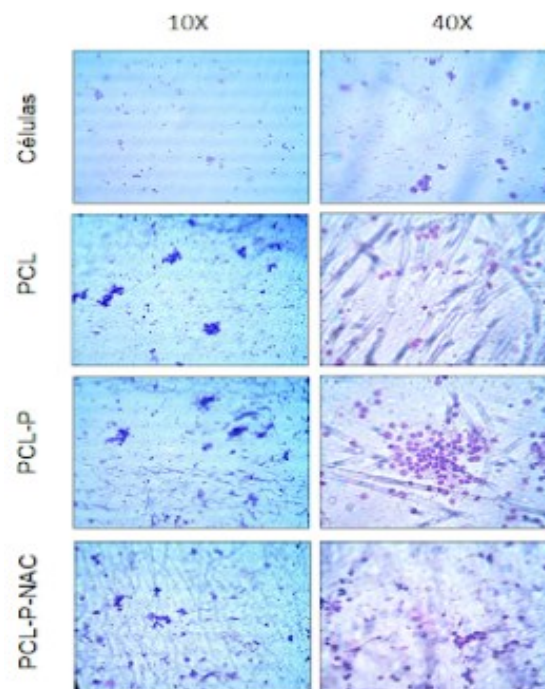


Figura 5: Microfotografías obtenidas del cultivo celular de células mononucleares, capturadas a 10X y 40X, utilizando el colorante Giemsa.

La evaluación de la morfología celular a un aumento de 40X mostró que las células sembradas en las diferentes superficies de scaffolds no presentaron cambios significativos en comparación con aquellas sembradas solo con el medio de cultivo. Este hallazgo sugiere que las sustancias presentes en los scaffolds no interfieren negativamente con la adhesión y crecimiento celular. Además, esto respalda la citocompatibilidad de las sustancias en las membranas, sugiriendo que podrían ser una opción viable para aplicaciones biológicas.

Evaluación de la adherencia celular

Los resultados de la evaluación cuantitativa de la adherencia de las células sanguíneas cultivadas en la superficie, junto con su análisis mediante el Método de Tukey, se presentan de manera visual en las Figuras 6 y 7.

Los resultados de este estudio revelan interacciones significativamente distintas entre

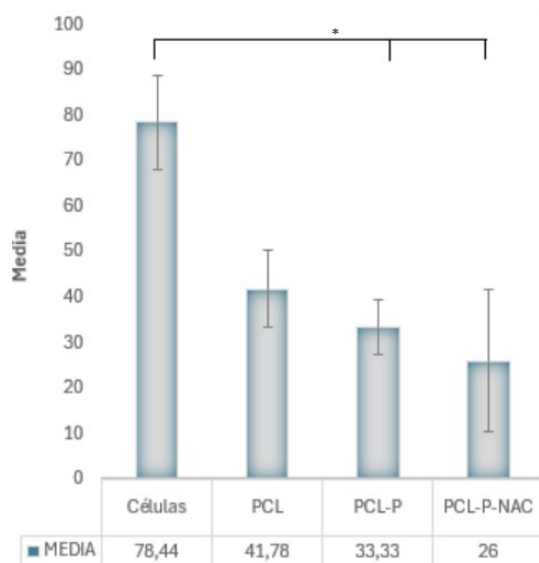


Figura 6: Media del conteo celular en los diferentes grupos de estudio, utilizando células PMN de la sangre y sus desviaciones estándares. Nota: Muestras con * son significativamente diferentes entre sí con $p > 0.05$.

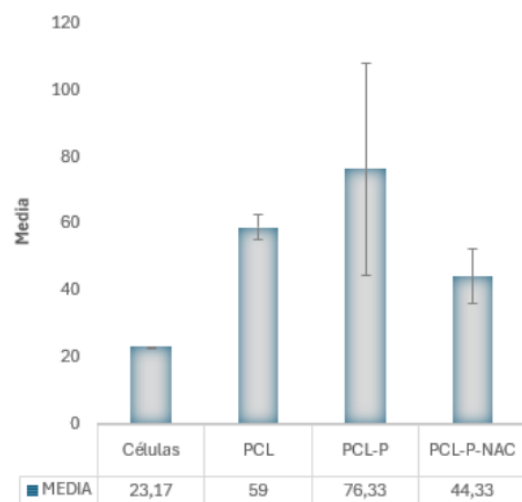


Figura 7: Media del conteo celular en los diferentes grupos de estudio, utilizando células mononucleares de la sangre y sus desviaciones estándares. Nota: No hay muestras que difieran significativamente entre sí con $p > 0.05$.

los diferentes grupos y las células polimorfonucleares, predominantemente

compuestas por neutrófilos con características inflamatorias. Notablemente, se observó una reducción en la adhesión celular de células inflamatorias sanguíneas en PCL-P-NAC, lo cual era esperado considerando las propiedades antiinflamatorias documentadas de la NAC. Estudios previos respaldan la capacidad de la NAC para reducir de manera significativa la respuesta inflamatoria local y desempeñar un papel crucial en retrasar su desarrollo, como se menciona en el trabajo de Sevillano (2014).

Por otro lado, los resultados derivados del análisis de los grupos cultivados con células mononucleares revelaron un aumento en la adhesión celular en PCL-P, lo que demuestra la influencia positiva de la polilisina en la adherencia celular. Sin embargo, a diferencia de los resultados observados con los polimorfonucleares, no se encontraron diferencias significativas entre los distintos grupos. Esta falta de significancia podría atribuirse al tamaño muestral insuficiente, lo que limita la capacidad de establecer conclusiones concluyentes sobre el efecto modulador de la NAC en estas células.

La disparidad en los resultados entre células PMN y MN podría asociarse al papel dual de los monocitos, que pueden actuar como macrófagos M1 o M2, es decir, como células proinflamatorias y antiinflamatorias, respectivamente, según el microambiente circundante y las condiciones específicas. Esta complejidad sugiere que el efecto antiinflamatorio de la NAC sobre los monocitos podría no manifestarse de manera evidente en esta configuración experimental.

Ensayo de viabilidad celular por XTT

Los porcentajes de viabilidad celular obtenidos en cada grupo de estudio se presentan en la Tabla 1.

Los resultados demostraron que el grupo PCL, tratado con plasma, por sí solo presenta un menor porcentaje de viabilidad celular que el resto de los grupos, lo que sugiere un ligero efecto negativo de la misma. En cambio, la introducción de polilisina mostró un impacto positivo, aumentando el porcentaje de viabilidad y sugiriendo una contribución beneficiosa en la interacción celular. La presencia de NAC en el grupo PCL-P-NAC

podría desempeñar un papel en la mejora de la viabilidad celular, aunque ligeramente inferior al grupo PCL-P. Comparaciones con estudios previos respaldan la favorable proliferación celular en membranas con NAC, posiblemente atribuible a la tasa de liberación lenta de NAC, como se reporta en el estudio de Mahumane et al. (2020).

Tabla 1: Viabilidad celular con cultivo de glóbulos blancos (media $\pm$ desviación estándar, $n=2$). Nota: Dado el tamaño muestral reducido, los resultados deben considerarse preliminares y no permiten establecer conclusiones estadísticas concluyentes.

Grupo	Media	Viabilidad (%)	Desviación Estándar
Células	0,422	100	0,085
PCL	0,275	65,284	0,016
PCL-P	0,313	74,171	0,015
PCL-P-NAC	0,307	72,749	0,013

El porcentaje de viabilidad celular se reportó en relación al grupo control. De acuerdo con la norma ISO 10993-5, las membranas se clasifican como débilmente citotóxicas con valores de viabilidad por debajo del 80%. Sin embargo, el tamaño muestral limitado impide hacer afirmaciones concluyentes.

Conclusiones

La fabricación de scaffold mediante la técnica de electrospinning usando un colector rotatorio, permite la obtención de fibras orientadas en forma paralela y con un diámetro adecuado para ingeniería tisular de tejido nervioso. En la funcionalización de los mismos mediante tratamiento con plasma de oxígeno, se observó

una mayor hidrofiliidad, lo que podría facilitar una mayor degradabilidad, aunque esta hipótesis no fue evaluada en el presente trabajo.

Los scaffolds se evaluaron en relación con la adhesión de células inflamatorias presentes en la sangre. Los ensayos preliminares para la adhesión celular indicaron que las especies funcionalizadas con la adición de polilisina promovieron la adherencia y proliferación celular. En contraste, la N-acetilcisteína mostró propiedades antiinflamatorias que afectan la proliferación de neutrófilos. También se observaron diferencias en la adherencia de células mononucleares, aunque estas no fueron estadísticamente significativas, lo que resalta la dualidad de los monocitos en su respuesta inflamatoria y la limitación del tamaño muestral para confirmar estos hallazgos. La morfología celular no presentó cambios significativos, lo que respalda la compatibilidad de las sustancias en los scaffolds.

En cuanto a la citotoxicidad celular, los scaffolds se evaluaron mediante el ensayo colorimétrico con XTT. Los resultados sugieren una buena citocompatibilidad de los componentes empleados y no evidenciaron liberación evidente de sustancias tóxicas. Sin embargo, debido al tamaño muestral limitado ($n=2$), estos resultados deben considerarse preliminares y no permiten establecer conclusiones definitivas.

En conjunto, estos resultados sugieren un potencial prometedor de los scaffolds funcionalizados con sustancias antiinflamatorias para reducir la inflamación y la formación de cicatrices gliales en pacientes con lesión medular. Estas características podrían aumentar el potencial de aplicación de estos scaffolds en el desarrollo de dispositivos biomédicos para la regeneración del tejido nervioso, destacando su viabilidad para futuros tratamientos en la ingeniería de tejidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por PIP 2022 (CONICET), PIUNT E741 de la Secretaría de Ciencia, Arte e Innovación Tecnológica (SCAIT, UNT) y el INTI. Además, se agradece el aporte científico realizado en este trabajo al Dr. Juan Carlos Valdez.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballesteros Plaza, V., Marré Pacheco, B., Martínez Aguilar, C., Fleiderman Valenzuela, J., Zamorano Pérez, J.J., Plaza, V.B., Pacheco, B.M., Aguilar, C.M., Valenzuela, J.F. & Pérez, J.J.Z. (2012). "Lesión de la médula espinal: actualización bibliográfica: fisiopatología y tratamiento inicial", *Coluna/Columna*, Vol. 11, pp. 73-76. <https://doi.org/10.1590/S1808-18512012000100014>
- Felice, B. (2017). Estudio comparativo de nanoestructuras de ZnO para la preparación de scaffolds para ingeniería de tejido óseo. Tesis doctoral, universidad Nacional de Tucumán.
- Garate, O., Veiga, L., Medrano, A.V., Longinotti, G., Ybarra, G., & Monsalve, L.N. (2018). "Waterborne carbon nanotube ink for the preparation of electrodes with applications in electrocatalysis and enzymatic biosensing", *Materials Research Bulletin*, Vol. 106, pp. 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.05.015>
- Gibson, J., Lasorsa, C., & Hermida, É.B. (2007)., "Modificación de la hidrofiliidad del biopolímero PHBV mediante tratamiento superficial con plasma".
- International Organization for Standardization (ISO) (2009). ISO 10993-5:2009 - Biological evaluation of medical devices—Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity. [online] Available at: <https://www.iso.org/standard/36406.html>.
- Li, Y., Dong, T., Li, Z., Ni, S., Zhou, F., Alimi, O.A., Chen, S., Duan, B., Kuss, M. & Wu, S. (2022). Review of advances in electrospinning-based strategies for spinal cord regeneration. *Materials Today Chemistry*, 25, 100972.
- Mahumane, G.D., Kumar, P., Pillay, V. & Choonara, Y.E. (2020). "Reposicionamiento de N-acetilcisteína (NAC): andamiaje de administración de fármacos electrohilado cargado con NAC para una posible aplicación en ingeniería de tejidos neuronales", *Pharmaceutics*, Vol. 12, No. 10, pp. 934. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12100934>
- Molinari, F., Medrano, A.V., Bacigalupe, A., Escobar, M.M., & Monsalve, L.N. (2018). "Different dispersion states of MWCNT in aligned conductive electrospun PCL/MWCNT composites", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, Vol. 26(10), pp. 667-674.
- Orr, M.B., & Gensel, J.C. (2018). "Spinal Cord Injury Scarring and Inflammation: Therapies Targeting Glial and Inflammatory Responses Introduction: Glial Effectors of Spinal Cord Injury Scarring and Inflammation", *Neurotherapeutics*, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13311-018-0631-6>
- Praveen, K.M., Thomas, S., Grohens, Y., Mozetic, M., Junkar, I., Primc, G., & Gorjanc, M. (2016). "Investigations of plasma-induced effects on the surface properties of lignocellulosic natural coir fibers", *Applied Surface Science*, Vol. 368, pp. 146-156.
- Ren, Y., Zhou, X. & He, X. (2014). Function of microglia and macrophages in secondary damage after spinal cord injury. *Neural Regeneration Research*, 9, pp.1787–1795. doi:10.4103/1673-5374.143423
- Sevillano Marcos, S.M. (2004). "Contribución de la generalidad de radicales libres de oxígeno en la pancreatitis aguda inducida por obstrucción bilio-pancreática: Estudio del efecto de la N-acetilcisteína", Universidad de Salamanca (España).
- Talac, R., Friedman, J.A., Moore, M.J., Lu, L., Jabbari, E., Windebank, A.J., Currier, B.L., & Yaszemski, M.J. (2004). "Animal models of spinal cord injury for evaluation of tissue engineering treatment strategies", *Biomaterials*, Vol. 25, pp. 1505-1510. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00497-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00497-6)

Este trabajo se realizó en el periodo 2023-2024, en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología- Universidad Nacional de Tucumán, en el marco de la tesina de grado para obtener el título de Ingeniera Biomédica de Aldana Busi, cuya dirección estuvo a cargo de la Dra. Andrea Rodriguez y la codirección del Dr. Leandro Monsalve y Lic. Julio Argañaraz Aybar.

AUTORES

BUSI, Aldana

Ingeniera Biomédica egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Auxiliar Docente Graduado de la carrera de Ingeniería Biomédica de la FACET-UNT.

ORCID  0009-0000-6060-6993

ARGAÑARAZ AYBAR, Julio

Licenciado en Biotecnología egresado de la Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia de la Universidad Nacional de Tucumán FBQF-UNT. Jefe de Trabajos Prácticos de la cátedra de Inmunología FBQF-UNT.

KOZUSZKO, Silvia

Odontóloga egresada de la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Tucumán. Magíster en investigación en ciencias de la Salud otorgado facultad de Medicina UNT. JTP en la cátedra de Anatomía y fisiología Patológicas FOUNT

MONSALVE, Leandro

Licenciado en Ciencias Químicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Doctor de la Universidad de Buenos Aires, área Química Orgánica (FCEN-UBA). Profesor Adjunto del Instituto de la Calidad Industrial de la Universidad Nacional de San Martín. Profesional Tramo A en INTI Textiles. Investigador Independiente de CONICET.

ORCID  0000-0001-9306-8618

RODRIGUEZ, Andrea

Odontóloga egresada de la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Tucumán. Doctora en Ingeniería de Tejidos egresada de la Universidad de Okayama, Japón. Profesor Adjunto de la carrera de Ingeniería Biomédica de la FACET-UNT. Investigador Adjunto del INSIBIO-CONICET.

aprodriguez@herrera.unt.edu.ar ORCID  0000-0002-4904-6187

Optimización de anclajes y acopladores para sistemas de postensado mediante modelos numéricos

CORDERO, Mariela ¹; APARICIO BENGOCHEA, Ángel ²

¹ MK4 World Wide, S.L., Polígono Industrial Can Nadal, Calle Can Nadal s/n, Nave 1-A, 08185 Lliçà de Vall, Barcelona, España.

² Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), ETSI Caminos, C.- y P., Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental, Edificio C1, Calle Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España.

Resumen

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de postensado se basan más en resultados experimentales que en un estudio científico exhaustivo que combine la teoría con la experimentación. El objetivo de este trabajo es presentar la optimización de un modelo numérico existente para diseñar cabezas de anclaje y acopladores de la empresa MK4 World Wide, S.L. Con este proyecto se pretende reducir las dimensiones de estos productos, lo que contribuye al ahorro de material y mejora la calidad. Aquí se presentan los resultados obtenidos del anclaje 12/0.6" y del acoplador 24/0.6" pertenecientes a la familia de postensado MK4 TK (López et al., 2008; Oñate, 1995).

Palabras clave: postensado, placas y acopladores de anclaje, modelo numérico

Abstract

Currently, most post-tensioning systems are based more on experimental results than on an exhaustive scientific study combining theory with experimentation. The objective of this paper is to present the optimization of an existing numerical model to design anchor heads and couplers of the company MK4 World Wide, S.L. This project aims to reduce the dimensions of these products, which contributes to material savings and improves quality. Here the results obtained from the anchorage 12/0.6" and the coupler 24/0.6" belonging to the MK4 post-tensioning family are presented (López et al., 2008; Oñate, 1995).

Key words: post-tensioning, anchor head and coupler, numerical model

Introduction

Innovation and quality improvements are the new challenges in the civil sector. Improving the design of post-tensioning systems fosters their advantages in a sustainable way in the medium and long term (López et al., 2008; Oñate, 1995). Numerical models and their comparative with experimental results are exposed in this paper (Oliver and Agelet de Saracibar, 2003).

This work presents part of the results obtained in an extensive project that was developed together with the UPC, Barcelona Tech. Numerical models and their comparative with experimental results are exposed in this paper. These results are applied for the optimization of two existing anchorages of the Mk4 post-tensioning system.

For this study, a commercial mesh GiD developed at the International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), was used. The finite element code DRAC,

developed at the Department of Ground Engineering of the Polytechnic University of Catalonia was used for the calculations.

Model for anchorage–wedge–strand

A post-tensioning anchorage is formed for three basic components: anchor head, wedge, prestressing steel strand. These three elements have very different mechanical properties. Other property difficult to estimate is the friction coefficient between these components.

In a first phase of the study, a reliable and verifiable model is fitted based on experimental results. For this, two geometrical models are developed:

a) Model 1: wedge and strand are modeled as a single dummy material with conveniently proposed material properties. The contact area between this material and the anchor head is modeled as a transition material, with great shear deformability.

b) Model 2: each element is modeled separately. Two contact areas are defined: one between anchor head and wedge, the other between wedge and strand. The contact area between the wedge and the strand is model with a great deformability at shear stress.

This study is focuses on the behavior of the post-tensioning anchorage and not on the mechanism to transmit the stresses to the structure. Because of this, no analysis about concrete cracking is done.

The anchor head is manufactured with carbon steel C45, this material has to guarantee a yield stress > 350 MPa.

Model 1

Three materials formed the first model (Fig. 1). The anchor head material (in green color) is carbon steel C45 with elasticity modulus $E = 210$ GPa. The wedge material and the contact area (in magenta and blue, respectively) are designed with parameters to be calibrated.

The blue material is modeled with a great shear deformation and 4mm crown radius. This material is acting as a transition volume.

Finally, the strand and the wedge are modeled with a dummy material (magenta color). This material is more stiffness than the contact area but less than the carbon steel of the anchor head. The friction coefficient for the three materials is 20%.

The characteristics of the mesh used in the finite element model is:

- Nodes: 4000

- Elements: 18000

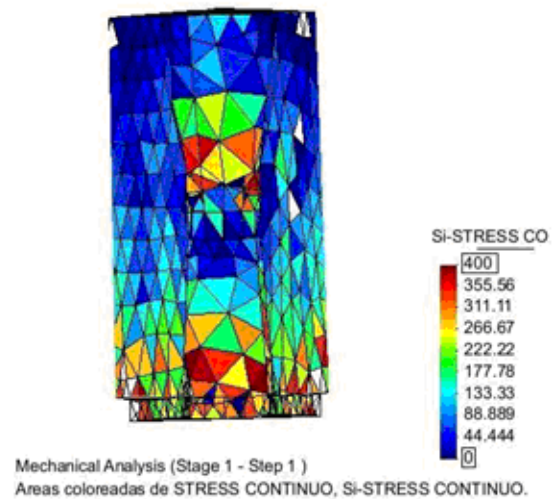


Figure 1: Model 1 – Post-tensioning anchorage

The elements are linear tetrahedrons, with an average size of 4 mm. The material is assumed working in the elastic zone. This behavior has to be corroborated.

Firstly, the model is calibrated using the experimental tests results (Marques, 1984). In its final position, the distance between the upper faces of the wedge and the anchor head is 2,5mm. Calibrate a model is equivalent to determine the elasticity modules of each material to satisfy this final position.

After many calculations using different values, the best result is:

- Elasticity modulus for dummy material = 9,5 GPa
- Elasticity modulus for contact area = 2 GPa
- Elasticity modulus for anchor head = 210 GPa

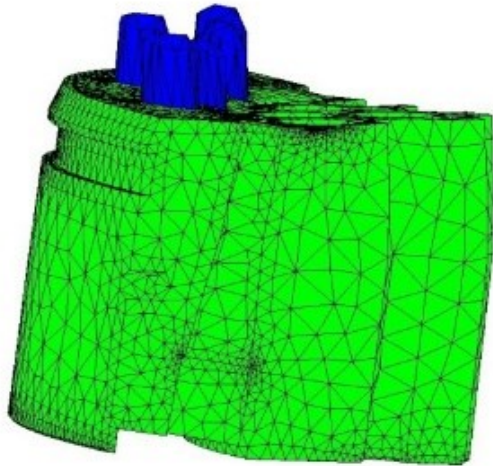
In this model, the post-tensioning force has been introduced at the top of the dummy material, within a radius of 10 mm, and for 115% of the breaking load to guarantee a higher level of stress. In this way, the force considered for a strand is:

$$F_{\max} = 1.15 \cdot 140 \cdot 1860 = 299460 \text{ N} \quad (1)$$

This force is distributed among the nodes corresponding to the application area.

The deformation distribution is practically non-existent (0.35mm) in the transition material (Fig. 2) making the dummy material stiff enough to simulate the deformations. The fact of considering two fictitious materials does not

extract additional significant information, and one of them can be dispensed with without loss of veracity. From a conservative point of view, only one dummy material with elasticity modulus = 9 GPa will be used.



DEFORMACIÓN (x25): DISPLACEMENTS de Mechanical Analysis (Stage 1 - Step 1), paso1.

Figure 2: Displacement in the upper face (Model 1).

In all the simulations the maximum tensile stress is less than 350 MPa so the element does not plasticize and the model is consistent. This model is considered valid for the characteristics given.

Indeed, the main limitation of this model is that it does not correctly collect the stresses in the contact area, since it is simulated with a fictitious material. However, it is useful to establish the stresses in the anchor head. Characteristic that will be the main concern in the optimization that arises.

Model 2

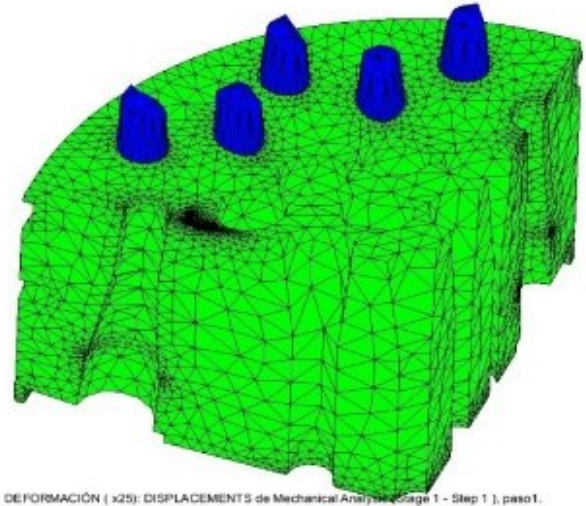
The model 2 consider each element of an anchorage by separate and two contact areas or transition zones (Fig. 3). Therefore, the model has three elements:

- a) Anchor head = green color
- b) Steel strand = brown color
- c) Wedge = magenta color

And two contact areas with high shear stress deformation:

- a) Between anchor head and wedge = blue color
- b) Between wedge and steel strand = light green

These areas will represent the slippage of the wedge.



DEFORMACIÓN (x25): DISPLACEMENTS de Mechanical Analysis (Stage 1 - Step 1), paso1.

Figure 3: Model 2 – Post-tensioning anchorage.

The characteristics of the mesh used in the finite element model is:

- Nodes: 9000
- Elements: 38000

This mesh is denser because of the contact areas. These areas are taken from 1mm. The elements are linear tetrahedrons with an average size 0.25mm. A very relevant point in the definition of the model lies in the definition of the transition zones, which percentage must be sufficient to avoid influencing on the stresses. It is believed that in this model, with transitions of approximately 30% of the wedge thickness, this condition is fulfilled, in compromise with the complexity of meshing areas of small relative size. It is estimated that in this model, where the transitions are approximately 30% of the wedge thickness, this condition is fulfilled, in compromise with the complexity of meshing areas of small relative size.

In this model, the material characteristics are:

- Elasticity modulus for anchor head = 210 GPa
- Elasticity modulus for steel strand = 180 GPa
- Elasticity modulus for wedge = 210 GPa

All the Poisson modulus are equal to 20% as in the first model. The contact areas are calibrated in the same way that in the first model. The same properties are applied to the both

transition materials because are considered identical. The stress obtained for these materials is 350MPa.

Forces are introduced in the model by imposing actions on the underside of the strand. Deformations are amplified because the length of the strand. For a slippage of the wedge imposed, the deformations are shown in Fig. 4.

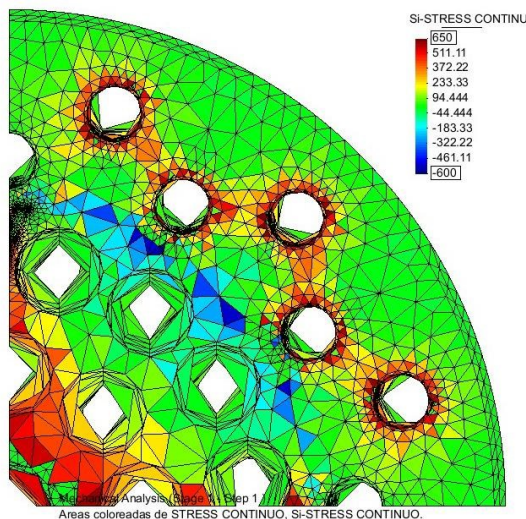


Figure 4: Displacements in the upper face (Model 2).

In this case, the geometry of the deformed mesh is very representative (Fig. 5), since it simulates the wedge penetration phenomenon appropriately. The result obtained in the simulation is very close to 2.5mm, this value coincides with the experimental results (starting hypothesis).

The stresses obtained with model 2 are very similar to the results with model 1. In both cases the stresses in the anchor head are less than 350 MPa. Model 2 represents the contact between wedge – strand and between wedge – anchor head, this is the significant difference with model 1.

This model is very useful to simulate displacements and stresses in the anchorage but in other hand, incorporated numerical and geometry complexity to the model. Unlike the model 1, in this one it is not possible to eliminate the transition elements because they are the basis for the veracity of the model. For this reason, model 2 can be useful in some particular cases where information about contact areas are needed. This model is too

complex to evaluate the structural integrity of the anchor head or coupler.

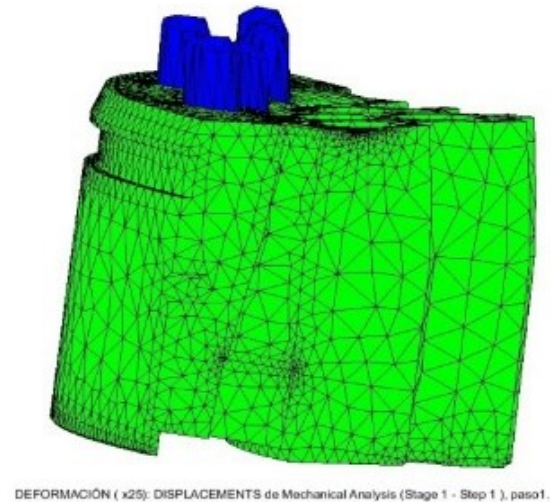


Figure 5: Deformed mesh (Model 2).

Finally, the calibrations performed are used to establish the loads for specifics anchorages and couplers.

Post-tensioning coupler 12/0.6" model

Taking advantage of the symmetry of the coupler 12/0,6", its structural behavior is modeled by means of 1/8 piece. The respective restraints are simulated in the parallel faces. This model has two materials as model 1:

- a) Anchor head = green color
- b) Dummy material = blue color

Where their properties are:

- Elasticity modulus for anchor head = 210 GPa
 - Elasticity modulus for dummy material = 9 GPa
 - Poisson modulus for both materials = 20%
- In order to collect the areas of small thickness, the mesh proposed has:
- Nodes: 7000
 - Elements: 37000

The elements are linear tetrahedrons with an average size = 3 mm. As in the previous cases, a linear behavior will be assumed and then the stresses will be analyzed.

To simplify the calculation and eliminate the local effects of the lower wedges, the support on the underside of the coupler is modeled (Fig. 6). In Fig. 7, the anchor head displacements and its relatively little flexion are shown. In these

results, it is observed that the displacements in the support compression area are less than in the rest of coupler. However, what is really important in this case is the differential movements between some areas and others, because the fixed points are not so clearly defined.

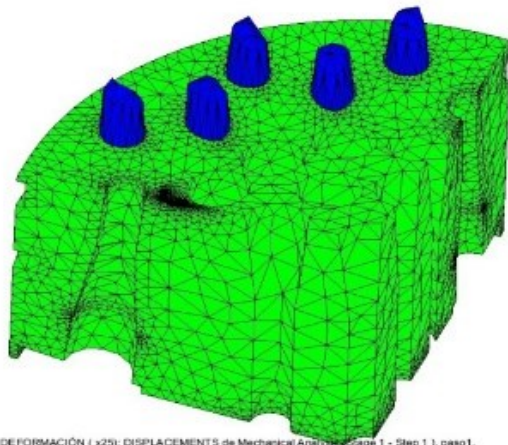


Figure 6: Upper and lower views of the model.

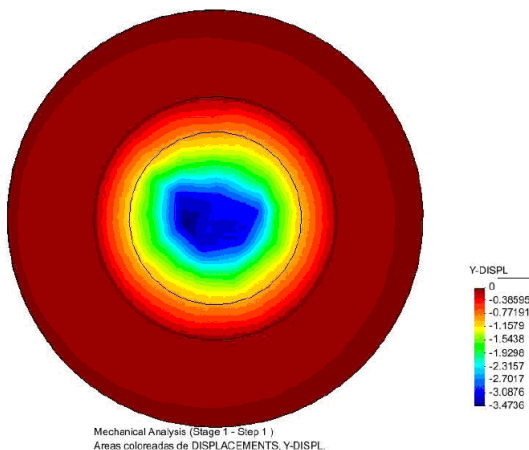


Figure 7: Displacements obtained with the finite element model (1/8 coupler 12/0.6").

After analyzed the deformations in the piece of coupler, the stresses are studied. A shear failure through tangential stresses on a cylindrical surface perpendicular to the bearing plane is presumed.

A vector flow diagram of maximum tensile stresses is presented to illustrate the stresses mentioned (Fig. 8).

In Fig. 8, it can be seen that the flow generates a zone of high tensile stresses between the two holes of the strands. These stresses reached

the tensile stresses of the support. These tensile stresses in the support zone represent a mathematical result of balance due to the imposed conditions. In reality, this area would be supported by two compressions, one on the upper face and one on the lower face, both in contact with the concrete.

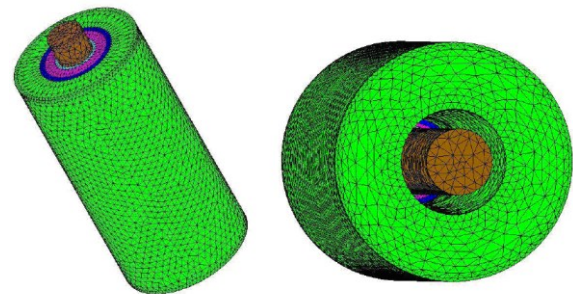


Figure 8: Flow diagram of maximum tensile stresses.

The principal stresses obtained with this model are shown in Fig. 9.

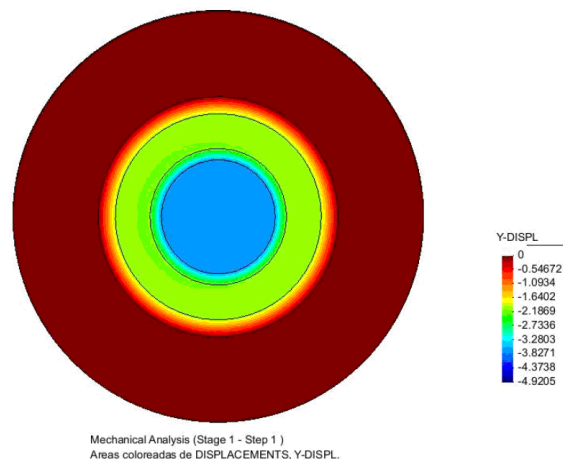


Figure 9: Flow diagram of maximum compression stresses.

Logically, in this scheme the complementary information to Fig. 7 can be observed: the low compression stresses are in the cited plane, while the central area of coupler is requested at large compressions. It should be noted that the intermediate main stress has very small values and is not relevant in this study.

The maximum tensile stresses appeared in the cylindrical plane shown before (Fig. 10). The highest stresses are small and they are lower

than the material yield stress so the model is stable.

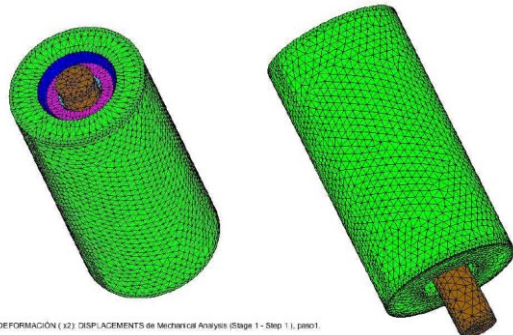


Figure 10: Flow diagram of maximum compression (detail).

Comparing these results with the test ones, it concludes:

- Load applied to de model = 1,15 times strand breaking load
- Stable lineal model

The relation between the test results at 80% loaded and the numerical calculation are:

$$\frac{\text{Exp results}}{\text{Numerical results}} = \frac{0,8}{1,15} = 0,6970 \sim 70\% \quad (2)$$

Then, the numerical stresses are equal to 70% respected experimental results. dummy) and Poisson ratio 0.20.

Post-tensioning coupler 24/0.6" model

The study of ¼ piece of post-tensioning coupler 24/0,6" is presented. The same symmetry criteria, external loads and restraints conditions as in the previous model are applied.

The respective restraints are simulated in the parallel faces. This model has two materials:

- Anchor head = green color
- Dummy material = blue color

Where their properties are:

- Elasticity modulus for anchor head = 210 GPa
- Elasticity modulus for dummy material = 9 GPa

c) Poisson modulus for both materials = 20%
In order to collect the areas of small thickness, the mesh proposed has:

- Nodes: 7000
- Elements: 37000

The elements are linear tetrahedrons with an average size = 4 mm. In this model, the mesh in the central zone has larger elements because it

does not provide relevant information about the behavior of the coupler (Fig. 11). Instead, the mesh is densified in the areas of the holes because these are the most stressed zone. As in the previous cases, a linear behavior will be assumed and then the stresses will be analyzed.

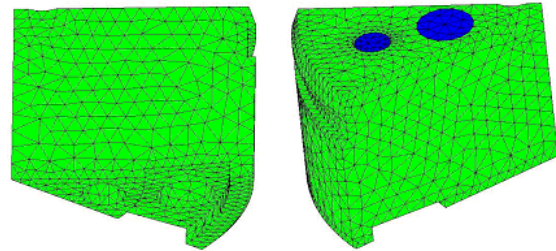


Figure 11: Upper and lower views of the model (24/0.6").

For this modeling, several support or restraints conditions have been studied. A circular support surface in the lower area with a width = 100 mm is adopted because is considered the most consistent with reality. As in the previous studies, the load considered for the calculations is:

$$F_{\max} = 1.15 * 140 * 1860 = 299460N \quad (3)$$

This load is the steel strand breaking load. In Fig. 12, the coupler's mesh deformed is shown. In the same figure, the bend zone is observed too but these results are not relevant. The importance of these results lies in the relative deformations between points of the mesh around the holes.

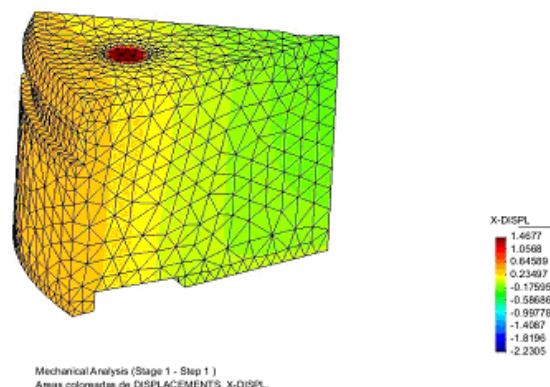


Figure 12: Front and side view of the deformed mesh.

In Fig. 13, the magnitude of the maximum tensile stresses obtained in the calculations are observed. The coupler's maximum stresses are near 650 MPa, in the tests results with the specimens plasticized the stresses arrived to 450MPa. Thus, this fact must be corroborated by means of a study with an elastoplastic behavior of the material.

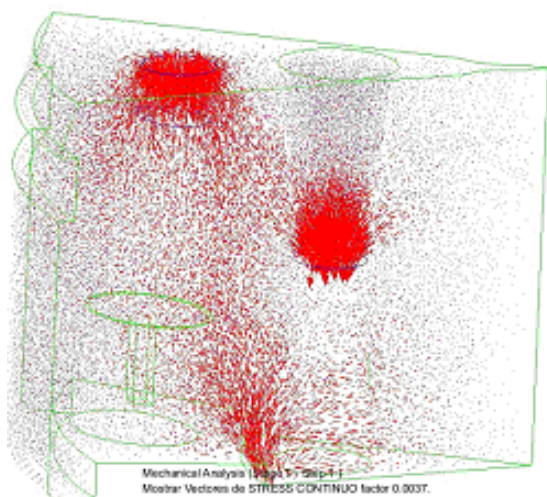


Figure 13: Maximum tensile stresses on the model surface.

In front to these results, it can be concluded that the main susceptibility of the coupler is in the area between strands with same sign. In figure 13, the interaction between the external strands can be seen.

Lastly, it should be mentioned that the stresses in the development of the x-axis (depth) have been studied to see their affectation, and they do not present great variations.

Conclusions

The linear model is a simplification that works well on a qualitative level and is useful for understanding how anchorages and couplers work (López et al., 2008; Oñate, 1995). The models give information about how stresses are distributed within them.

They can be enough to validate existing designs and help to propose optimization strategies, showing which are the critical areas of the pieces.

As an example, Table 1 shows an advance of results of the designs presented in the text and how they have been rated after the numerical study for further optimization.

To specify these optimization strategies, it will be necessary to develop a calculation model that includes elastoplastic materials.

Table 1: Couplers results.

Coupler	Theor.max. Stress	Exp.max. stress	Conclusions
12 strands	360 MPa	250 MPa	Material can be saved by reducing dimensions
24 strands	650 MPa	— (*)	In the absence of a more detailed elastoplastic study, the improvement strategy should be aimed at widening the gap between outer holes.

(*) The real behavior is not linear above 350 MPa.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Department of Civil and Environmental Engineering of the Technical University of Catalonia (UPC) for their collaboration and technical support in this research.

REFERENCES

López, C.M., Carol, I. & Aguado, A. (2008). "Meso-structural study of concrete fracture using interface elements. I: numerical model and tensile behaviour." *Materials and Structures*, 41, 583–599. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9314-1>

Marques, J. (1984). "Stress computation in elastoplasticity." *Engineering Computations*, 1, 42–51. doi not available.

Oliver, J. & Agelet de Saracibar, C. (2003). *Mecànica de medis continus per a enginyers*. Edicions UPC, Barcelona. doi not available.

Oñate, E. (1995). *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos: análisis estático lineal*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Barcelona. doi not available.

This work was developed during 2024 in the Department of Civil and Environmental Engineering of the Technical University of Catalonia (UPC), Spain.

AUTHORS

CORDERO VERGE, Mariela

Is PhD in Civil Engineering and Director of R&D at MK4 World Wide, S.L., a company specialized in structural systems for bridges and buildings. Her work focuses on product innovation, certification, and numerical modelling of post-tensioning systems, bearings, and expansion joints.

mcordero@mekano4.com

APARICIO BENGOCHEA, Ángel

Is Professor at the Technical University of Catalonia (UPC), specialized in structural engineering and bridge design. His research covers experimental analysis and finite element modelling of post-tensioned structures.

angel.carlos.aparicio@upc.edu

Atlas de radiación solar en la región del Noroeste Argentino basado en datos de reanálisis

SILVERO, Cristóbal ^{1,2}; MEDINA, Franco ^{1,2,3}
ZOSSI, Bruno ^{1,2,3}; ELIAS, Ana ^{1,2,3}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT).

² Universidad Nacional de Tucumán- CONICET. Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFINOA),

³ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Tucumán, Argentina.

Resumen

El estudio del recurso solar resulta crucial para evaluar la disponibilidad de energía y dimensionar adecuadamente las tecnologías destinadas a su aprovechamiento. En muchas regiones, como el Noroeste Argentino (NOA), que es el área de enfoque de este trabajo, no se cuenta con una red adecuada de estaciones meteorológicas que permitan trabajar con datos observacionales directos. Ante esta limitación, las bases de datos de reanálisis emergen como una alternativa viable. En este contexto, la elaboración de atlas solares juega un rol esencial en el impulso hacia sistemas energéticos más sostenibles. En este trabajo, a partir de 24 años de datos (2000-2023) de tres diferentes bases de datos de reanálisis, se elaboraron atlas de la irradiación solar promedio en la región y se hizo un análisis comparativo entre estas tres bases. Los resultados confirman que el NOA dispone de un gran potencial solar, lo que la convierte en una zona especialmente atractiva para el desarrollo de la energía fotovoltaica. El atlas resalta la viabilidad de instalar parques solares en la región, proporcionando información clara sobre las áreas óptimas para proyectos de energía renovable.

Palabras clave: radiación solar, reanálisis, energía solar.

Atlas of surface solar radiation in the northwestern region of Argentina using reanalysis database

Abstract

The study of the solar resource is crucial to evaluate the availability of energy and to adequately dimension the technologies for its use. In many regions, such as Northwest Argentina (NOA), which is the focus area of this work, there is no adequate network of meteorological stations to work with direct observational data. Given this limitation, reanalysis databases emerge as a viable alternative. In this context, the development of solar atlases plays an essential role in the drive towards more sustainable energy systems. In this work, based on 24 years of data (2000-2023) from three different reanalysis databases, atlases of the average solar irradiance in the region were elaborated and a comparative analysis was made between these three databases. The results confirm that the NOA has a great solar potential, which makes it a particularly attractive area for the development of photovoltaic energy. The atlas highlights the feasibility of installing solar parks in the region, providing clear information on the optimal areas for renewable energy projects.

Key words: solar radiation, reanalysis, solar energy

Introducción

La radiación solar incidente en la superficie es la principal fuente de energía para procesos biológicos, físicos y químicos en la Tierra. Además, es un parámetro esencial en modelos y simulaciones climáticas en general, y es un requisito previo para la planificación y operación eficiente de los sistemas de energía solar. Las mediciones en estaciones terrestres proporcionan la mejor estimación de este parámetro, pero presentan una cobertura espacial heterogénea y son insuficientes en muchas regiones de nuestro planeta. También está la limitación de la cobertura en el tiempo y de los períodos con mediciones disponibles. Actualmente, existen varios productos globales en cuadrículas, o grillas, con alta resolución espacial provenientes de sensores remotos y reanálisis. La teledetección por satélite es una de las formas más eficaces para obtener la radiación solar en superficie con alta precisión, aunque la cobertura temporal está limitada por el tiempo de tránsito del satélite. En el caso de modelos de reanálisis, sus datos presentan una buena cobertura espacial y series temporales largas, lo que las vuelve una interesante alternativa para algunas regiones (Bosilovich et al., 2013). Sin embargo, la heterogeneidad de las fuentes de datos y las diferencias en los esquemas de asimilación generan errores en los productos de reanálisis de radiación y, por lo tanto, comprender la incertidumbre y las desviaciones de los datos de reanálisis es esencial para su uso adecuado (Zhang et al., 2016; 2020).

Los datos del reanálisis, en general, se han utilizado en numerosos estudios de caracterización y variabilidad de diversos parámetros, sobre todo en regiones donde las mediciones de superficie, a pesar de ser más precisas, tienen una cobertura espacial y temporal limitada, como es el nuestro (Morales-Moraga et al., 2019, Peng et al., 2019).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un atlas de irradiancia solar en la región del Noroeste Argentino (NOA), que podría servir como herramienta para identificar en primera aproximación áreas óptimas para el aprovechamiento de la energía solar. Con este propósito se presentan valores promedio del período 2000-2023 de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA utilizando tres bases de datos diferentes de reanálisis: NCEP/NCAR R1 (Kalnay et al., 1996), MERRA

V2, y ERA5, seguido de un análisis comparativo entre estas bases. A estos atlas habrá que acompañarlos luego, junto con el testeo en base a algunos puntos con datos experimentales, con mapas adicionales de nubosidad, desviación estándar, y otras variables, necesarias en la determinación de una región para el aprovechamiento de la energía solar y el dimensionamiento de las tecnologías necesarias.

Datos

Los datos utilizados corresponden a las variables de cada uno de los tres reanálisis seleccionados: NCEP/NCAR R1, MERRA V2 y ERA5, que corresponden al valor de irradiancia solar medida por radiómetro en superficie, durante el período 2000-2023. Se describe a continuación cada una de estas variables.

Los datos de flujo de radiación solar directa en superficie, dwsrf (downward solar radiation flux) del reanálisis NCEP/NCAR R1, en (W/m^2), provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, se obtuvieron del sitio <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>. El dwsrf indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra y se considera una buena aproximación del valor que mediría un piranómetro. El reticulado tiene una resolución de 1.8° en latitud $\times$ 1.8° en longitud considerando la región del NOA comprendida entre los $20^\circ S$ y $30^\circ S$ en latitud, y $70^\circ O$ y $60^\circ O$ en longitud. Esto resulta en una grilla de 5 puntos en latitud $\times$ 6 en longitud (=30 puntos). Estos límites comprenden en realidad una región extendida que definimos en función de los valores de retícula disponibles en la base de datos de este reanálisis. Los datos obtenidos corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar. Los datos del ERA5 utilizados corresponden a la radiación solar en superficie hacia abajo, ssrd (Surface solar radiation downwards), en (J/m^2), disponibles en:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>.

Este reanálisis cuenta con una base de datos desde 1940 hasta el presente, y proporciona estimaciones horarias de ssrd con una resolución de latitud-longitud de 0.25° (41 valores de latitud $\times$ 41 valores de longitud=1681 puntos). El ssrd indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal

en la superficie de la Tierra y se refiere la suma de la radiación solar directa y difusa en el plano. Es decir que es equivalente al valor de la radiación que mediría un piranómetro (<https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/169>).

Los datos de ssrd se dividieron en 3600, para pasar de (J/m²) a (W/m²). Dado que estos valores corresponden a valores de irradiancia horarios, se estimaron a partir de ellos los valores promedios diarios, seguido del cálculo de los valores promedio mensual.

Los datos de MERRA V2 utilizados corresponden al flujo superficial neto descendente de onda corta, SWGNT (Surface Net Downward Shortwave flux), en (W/m²), que en buena aproximación es equivalente al valor de la radiación que mediría un piranómetro. Estos datos están disponibles en: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2>. La resolución espacial en este caso es de 0.5° en latitud x 0.625° en longitud (21 valores de latitud x 17 valores de longitud=357 puntos). Los datos obtenidos, al igual que en el caso de NCEP/NCAR, corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar.

Metodología

Para la creación de los atlas se eligió presentar los datos promedios mensuales y anual con la resolución espacial original de cada reanálisis utilizando mapas de colores discretos. Si bien en general los mapas de variables meteorológicas se muestran con curvas de nivel continuas, esto introduce supuestos de interpolación, que pueden no reflejar la variabilidad real de los datos entre los puntos de la grilla, sobre todo cuando hay fuertes gradientes de elevación como es el caso del NOA. Los mapas de colores discretos en cambio, respetan la naturaleza discreta de los datos de la grilla y representa visualmente cada celda de la grilla con un valor constante, evitando la interpolación. Con este tipo de mapas queremos también diferenciar las resoluciones de las tres bases de reanálisis que se analizaron.

Para el análisis comparativo se eligieron tres métodos estadísticos: el error absoluto medio (MAE, por las siglas en inglés de Mean Absolute Error), el error medio relativo (MRE, por las siglas en inglés de Mean Relative Error) y el coeficiente de correlación de Pearson (r)

(Gueymard, 2014; Chicco y Warrens, 2021; Silvero et al., 2023), dados por:

$$MAE = \frac{\sum |y - x|}{n} \quad (1)$$

$$MRE = \frac{\sum (y - x)}{n} * 100 \quad (2)$$

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3)$$

donde x corresponde a los datos de referencia, y a los datos alternativos que se quieren comparar, y n es el número de datos de cada serie.

La comparación en este caso es una comparación de valores promedios considerando la distribución espacial de la radiación. Se consideró como valor de referencia a los datos de radiación de ERA5, basados en un trabajo reciente de comparación de datos de radiación en Tucumán medidos en la ubicación (26.8°S, 65.1°O), en el período 2017-2018, en el cual ERA5 resulta, en función de los mismos estadísticos de comparación, más adecuado que NCEP/NCAR (Silvero et al., 2023).

El MAE mide la magnitud promedio de los errores en el conjunto de datos, sin tener en cuenta su signo, indicando en promedio cuánto difieren las predicciones de los valores reales. Un MAE bajo indica un modelo más preciso. El MRE mide la magnitud promedio de los errores relativos entre las predicciones y los valores reales, usado para evaluar la precisión en términos relativos de un conjunto de datos. El MRE se expresa generalmente como porcentaje. Un MRE positivo además indica sobreestimación de valores, y un valor negativo una subestimación del valor real. El coeficiente de correlación de Pearson, r, mide el grado de linealidad de la asociación entre x e y. Es decir que mide cuan similar es la variación de ambas series. Está limitado entre 1 y -1, donde 1 es el valor óptimo en nuestro caso indicando que ambas variables varían de forma idéntica. Se destaca que, en este caso, la variabilidad es espacial.

Dado que las grillas de los reanálisis considerados no coinciden, previo a estimar los estadísticos se realizó una interpolación bilineal de las grillas de ERA5 y del MERRA V2 para obtener los valores correspondientes en los puntos del grillado de NCEP/NCAR (reanálisis con menor resolución). Es decir que en este estudio n=30.

Resultados

Para mostrar los resultados obtenidos, se eligieron en el caso de los valores mensuales, un mes por estación del año: enero (verano), julio (invierno), abril (otoño) y octubre (primavera). La Fig. 1 muestra los atlas, o mapas, de los valores promedio mensual de la irradiancia solar en superficie para las tres bases de datos de reanálisis. La Fig. 2 muestra los promedios anuales.

En todos los casos se observa un gradiente longitudinal de radiación decreciente de oeste a este esperable en función del gradiente de relieve de la región. En el caso del gradiente latitudinal, decreciente de norte a sur, coincide también con lo que se espera en función del alejamiento respecto del ecuador geográfico a medida que aumenta la latitud.

La Tabla 1 presenta los estadísticos de comparación de los reanálisis NCEP/NCAR R1 y MERRA V2 con ERA5, para el caso de valores mensuales y anual. Se observa claramente que los valores de radiación de MERRA V2 son más comparables con ERA5 que los valores de NCEP/NCAR, los cuales en general sobreestiman los valores de radiación en la región (Silvero et al., 2023). Con respecto a la variabilidad espacial, si bien NCEP/NCAR presenta valores de r superiores a los de MERRA en los meses de invierno, en el promedio anual MERRA nuevamente es más comparable con ERA5.

Conclusiones

En este trabajo se elaboraron mapas de irradiancia solar global en superficie para la región del NOA considerando valores promedios mensual y anual en base a los datos provistos por tres reanálisis: ERA5, MERRA V2 y NCEP/NCAR. Se consideró el período 2000-2023 para estimar los promedios. Se hizo además un análisis comparativo considerando a ERA5 como referencia. Aunque lo ideal sería realizar esta evaluación con datos obtenidos directamente de mediciones, la falta de esos valores en la región nos llevó a usar los datos de este reanálisis como base para la comparación.

En cuanto a la variación espacial, para NCEP/NCAR, los valores de r fluctúan entre 0.72 y 0.90 a lo largo de los meses. En el caso del promedio anual resulta 0.89. Por su parte, MERRA V2 presenta una variación de r entre

0.78 y 0.85, alcanzando el valor 0.89 en el caso del promedio anual, en coincidencia con NCEP/NCAR. Ambos reanálisis muestran un patrón similar en el gradiente de variación latitudinal y longitudinal, lo cual concuerda con la tendencia esperada en la región, donde las elevaciones hacia el oeste y la ubicación al sur del ecuador influyen en la disminución progresiva de la radiación hacia el este y el sur, respectivamente.

En cuanto a los valores absolutos de radiación, MERRA V2 ofrece resultados más cercanos a los de ERA5 en comparación con NCEP/NCAR. Esto se refleja en los valores de MAE y MRE, que son consistentemente menores en todos los meses del año y en el promedio anual, como se evidencia en las Figuras 1 y 2, y en la Tabla 1. Para MERRA V2, el MAE varía entre 20 y 36 W/m^2 , mientras que para NCEP/NCAR se sitúa entre 34 y 60 W/m^2 . El MRE de MERRA V2 es, en promedio, de -5%, frente al 20% de NCEP/NCAR, lo que sugiere una sobreestimación notable de la radiación en la región del NOA por parte de NCEP/NCAR, algo que ya se notó en el trabajo de Silvero et al. (2023).

Con respecto a la disponibilidad de atlas del recurso solar en nuestro país y en la región, existen atlas de radiación solar para Argentina publicados como los provistos por Grossi Gallegos y Righini (2007) y Carmona et al. (2016, 2018), y los disponibles en la red, como por ejemplo el Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/>) del Banco Mundial. Específicamente, para la región del NOA, Laspiur et al. (2013), utilizando los datos de la base satelital SWERA, y Ceballos et al. (2023), con modelo satelital GL1.2, también proveen mapas. En este contexto nuestro trabajo pretende aportar datos adicionales en una región con escasas mediciones. Como trabajo a futuro, además de hacer una validación con una base de datos experimentales lo más denso posible en cuanto a cobertura espacial, y también temporal, se planea hacer un análisis comparativo con los trabajos mencionados, y sobre todo con valores de radiación a partir de mediciones satelitales. También incorporar el análisis de nubosidad y de radiación para condiciones de cielo claro. A pesar de las limitaciones inherentes al uso de reanálisis en lugar de datos observacionales, este análisis sugiere que MERRA V2, junto con ERA5, proporciona estimaciones más precisas de radiación solar en la región del NOA que

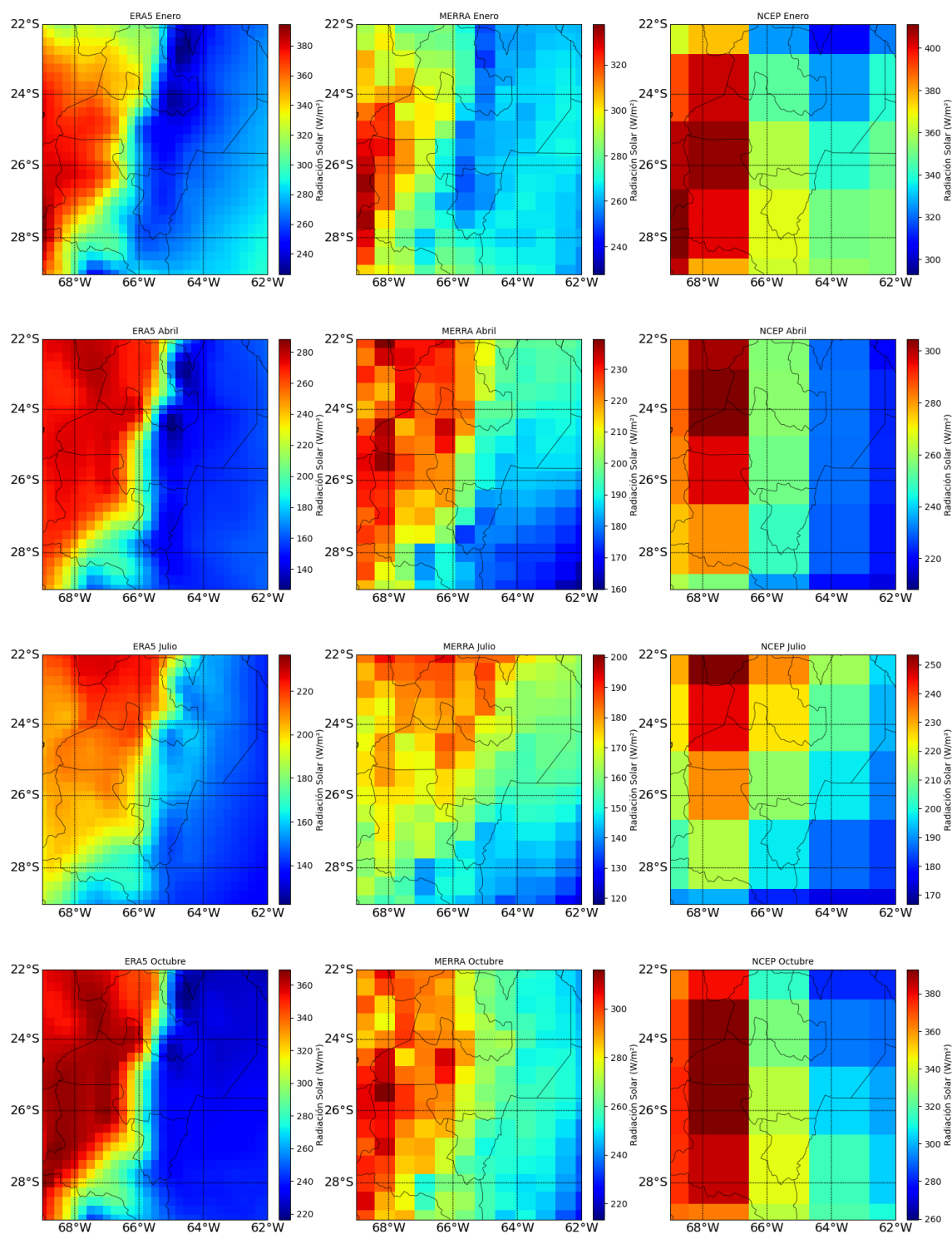


Figura 1: Promedios mensuales de radiación solar en superficie en el período 2000-2023 correspondiente enero (primera fila), abril (segunda fila), julio (tercera fila), y octubre (cuarta fila), utilizando los datos de reanálisis ERA5 (primera columna), NCEP/NCAR R1 (segunda columna) y MERRA V2 (tercera columna).

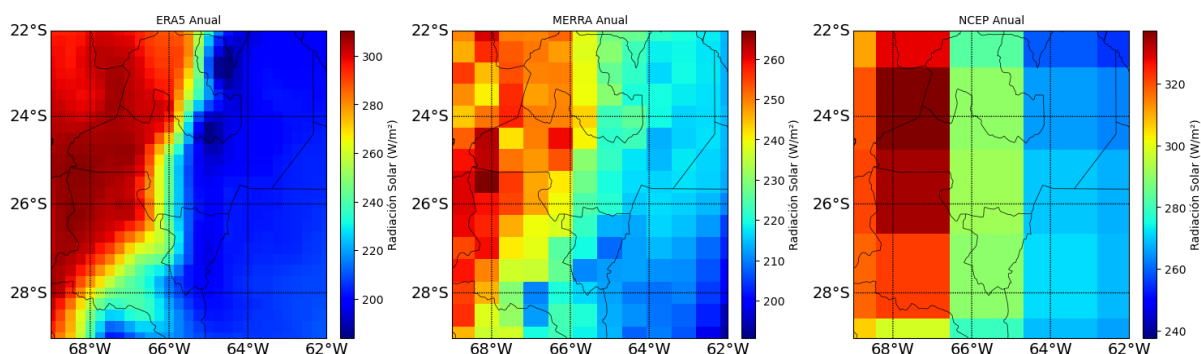


Figura 2: Promedios anuales de radiación solar en superficie en el período 2000-2023 utilizando los datos de reanálisis ERA5 (izquierda), NCEP/NCAR R1 (centro) y MERRA V2 (derecha).

Tabla 1: Estadísticos de comparación (r, MAE y MRE) entre los valores de irradiancia solar promedio en superficie para los meses de enero, abril, julio y octubre, y promedio anual, de las bases de reanálisis NCEP/NCAR R1 y MERRA V2 considerando como referencia los valores de ERA5.

Mes	R ERA5 vs.		MAE (W/m ²) ERA5 vs.		MRE (%) ERA5 vs.	
	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2
Enero	0.72	0.82	54.1	31.1	19.2	-7.2
Abril	0.85	0.85	48.6	28.7	29.2	3.1
Julio	0.89	0.81	35.7	19.9	24.0	-4.5
Octubre	0.83	0.83	49.6	33.4	19.6	-3.7
Anual	0.89	0.89	46.6	22.7	21.4	-4.4

NCEP/NCAR. No obstante, para obtener una validación más exhaustiva, sería necesario incorporar datos medidos en futuros estudios. En conclusión, estos resultados subrayan la relevancia de seleccionar adecuadamente las

bases de datos de reanálisis para estudios relacionados con el clima y la energía, destacando también la importancia de integrar datos observacionales en trabajos futuros para mejorar la precisión de las evaluaciones.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en el Proyecto de UE de INFNOA; PUE 22920200100008CO. Los autores agradecen también el financiamiento provisto por el proyecto PIP 2957.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bosilovich, M.G., Kennedy, J., Dee, D., Allan, R. & O'Neill, A. (2013). On the Reprocessing and Reanalysis of Observations for Climate. In: Asrar, G., Hurrell, J. (eds), *Climate Science for Serving Society*, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_3

Carmona, F., Orte, F., Rivas, R., Wolfram, E. & Kruse, E.E. (2016). Mapas de radiación solar global de la República Argentina a partir del producto SYN1-CERES, En actas del XVII Simposio Internacional

SELPER 2016. Geotecnologías, herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible, Buenos Aires, Argentina, 1-10.

Carmona, F., Orte, P.F., Rivas, R., Wolfram, E. & Kruse, E. (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground-based measurements and CERES_SYN1deg data, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Elsevier, 21, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003>

Ceballos, J.C., Forciniti, J.D. & Molina, M.L. (2023). Algunas características del régimen de radiación solar global en el noroeste argentino, período 2017-2021. Avances en Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 26, 345–356. Disponible en <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/3848>

Chicco D., Warrens M.J. & Jurman G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, PeerJ Computer Science, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>

Grossi Gallegos, H. & Righini, R. (2007). *Atlas de Energía Solar de la República Argentina*, SECYT-UNLu, Argentina. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/317478062_Atlas_de_Energia_Solar_de_la_Republica_Argentina

Gueymard, C.A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 1024–1034. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117>

Kalnay, E., Kanamitsu M., Kistler, R., Collins, W. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40- year reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

Laspiur, R., Salazar, G.A., Zerpa, J. & Watkins, M. (2013). Trazado de mapas medios anuales de energía solar global, directa, difusa y tilt, usando la base de datos de SWERA. Caso de estudio: provincias de Salta y Jujuy, Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 17, 47–52.

Morales-Moraga, D., Meza, F.J., Miranda, M. & Gironás, J. (2019). Spatio-temporal estimation of climatic variables for gap filling and record extension using Reanalysis data. Theoretical and Applied Climatology, 137, 1089–1104. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2653-8>

Peng, X., She, J., Zhang, S., Tan, J. & Li, Y. (2019). Evaluation of Multi-Reanalysis Solar Radiation Products Using Global Surface Observations. Atmosphere, 10, 42. <https://doi.org/10.3390/atmos10020042>

Silvero, C., Medina, F.D., Zossi, B.S., Mansilla, G.A., Heredia, T., Nollas, F. & Elias, A.G. (2023). Comparación entre datos de radiación solar global de Tucumán (26.8°S, 65.1°O) y la base de datos de reanálisis ERA5. Actas de Trabajos Completos Encuentro del E-ICES 18, Decimoctavo Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra, Malargüe, Mendoza, 21 al 24 de noviembre de 2023, 240-246.

Zhang, X., Liang, S., Wang, G., Yao, Y., Jiang, B. & Cheng, J. (2016). Evaluation of the Reanalysis Surface Incident Shortwave Radiation Products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA Using Satellite and Surface Observations. Remote Sens., 8, 225. <https://doi.org/10.3390/rs8030225>

Zhang, X., Lu, N., Jiang, H. et al. (2020). Evaluation of Reanalysis Surface Incident Solar Radiation Data in China. Scientific Reports 10, 3494. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1>

AUTORES

SILVERO, Cristóbal

Es Ingeniero Industrial (FACET, UNT), estudiante del Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT), y becario doctoral CONICET enmarcado en el PUE de INFNOA 22920200100008CO (Estudio del recurso solar en el NOA y su aprovechamiento mediante dispositivos semiconductores). Su tema de investigación es "Variabilidad y modelado de la radiación solar en la región del NOA aplicados al aprovechamiento energético".

crislobalivansilvero@gmail.com

MEDINA, Franco

Es Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT). Es docente de la FACET y becario postdoctoral CONICET en INFNOA (CONICET-UNT). Su tema de investigación es "Cambios observados y proyectados en la precipitación extrema en el Sudeste de Sudamérica y su asociación con los patrones sinópticos".

fdmedina@herrera.unt.edu.ar

ZOSSI, Bruno

Es Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT). Es Investigador Asistente de CONICET en INFNOA (CONICET-UNT).

bzossi@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-4197-7876

ELÍAS, Ana

Es Doctora en Física de la UNT. Es Investigadora Principal de CONICET en INFNOA (CONICET-UNT) y Profesora de Física Estadística I y II en la carrera de Licenciatura en Física de la FACET, UNT.

aelias@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0001-6271-4891

Universidades en transformación. El modelo humboldtiano, entre tradición y adaptación

NIEVA, Nicolás ^{1,3}; CABRERA, Miguel ²

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina.

² Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina.

³ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT). Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina.

El lado luminoso

El modelo humboldtiano universitario desarrollado por Wilhelm von Humboldt con la fundación de la Universidad de Berlín en 1810 trascendió sus fronteras germánicas para convertirse en uno de los referentes más influyentes de la educación superior a nivel mundial. Su expansión global ha dado lugar a adaptaciones particulares en distintas regiones, conservando los principios fundamentales —la unidad entre docencia e investigación, la autonomía académica, la formación integral—, al tiempo que incorpora elementos culturales, económicos y sociales propios de cada contexto.

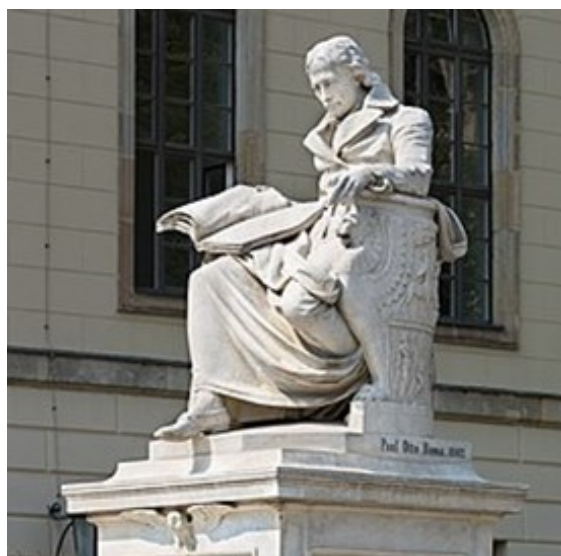


Figura 1: Estatua de Wilhelm von Humboldt, del artista Paul Otto. Imagen de Wikipedia.

La transformación del sistema universitario estadounidense

En Estados Unidos, la incorporación de este enfoque constituyó una de las transformaciones más significativas en la historia de su sistema universitario. El proceso se inició en el siglo XIX cuando instituciones tradicionales, hasta entonces influidas por el modelo inglés, comenzaron a reformar sus estructuras académicas. La universidad de Harvard encabezó esta renovación bajo la presidencia de Charles W. Eliot (1869-1909), al abandonar un currículo rígido en favor de un esquema investigativo inspirado en la tradición alemana, que integraba la generación y transmisión del conocimiento.

Este giro paradigmático se extendió luego a instituciones universitarias como el Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Universidad Stanford, la Universidad Yale, la Universidad de Princeton, la Universidad de Columbia, la universidad de Chicago y la Universidad de California en Berkeley, hoy reconocidas como centros de excelencia en investigación y clasificadas como "*research universities*" o "*R1 universities*" en el sistema Carnegie. Estas instituciones mantienen la articulación entre producción científica y docencia, la autonomía de sus cuerpos académicos y una sólida orientación hacia los estudios de posgrado y doctorado.

Sin embargo, el contexto estadounidense introdujo modificaciones sustantivas. Entre ellas, se destaca la estrecha relación con el sector productivo, que propició mecanismos de transferencia tecnológica y la comercialización de resultados científicos. Asimismo, el financiamiento mixto, que combina recursos públicos y privados y una cultura institucional orientada tanto a la excelencia académica

como a la aplicabilidad del conocimiento, han dado lugar a una versión particular de este ideario formativo.

La preservación y renovación del modelo en Europa

En Europa, región de origen de este modelo educativo, se observa una coexistencia entre la preservación de sus principios fundacionales y las adaptaciones requeridas por los desafíos contemporáneos. Alemania conserva la expresión más fiel de la tradición, con un sistema universitario público en el que los profesores son funcionarios estatales y la investigación científica representa un objetivo institucional central. La Universidad Humboldt de Berlín —junto a otras instituciones como la Universidad Técnica de Múnich, la Universidad Libre de Berlín, y las universidades de Heidelberg, Göttingen y Múnich— siguen siendo referentes internacionales.

En otros países europeos, las influencias de este modelo se han integrado de manera diversa. El Reino Unido, a pesar de su apego histórico al formato *oxbridge*, ha visto cómo sus universidades más destacadas —especialmente las pertenecientes al Grupo Russell— han incorporado progresivamente la articulación sistemática entre investigación y docencia. Suiza, por su parte, ha desarrollado una versión altamente exitosa del enfoque integrador, especialmente a través de los Institutos Federales de Tecnología (ETH) de Zúrich y Lausana, que combinan excelencia académica con una intensa producción científica de nivel global. Francia, tradicionalmente estructurada bajo el esquema napoleónico que separaba funciones entre institutos de investigación y universidades docentes, ha avanzado hacia una integración funcional más estrecha, particularmente en sus centros académicos más relevantes.

Estas transformaciones han permitido a Europa preservar el núcleo conceptual de la tradición humboldtiana al tiempo que incorporan elementos como la internacionalización, fuentes de financiamiento más diversificadas y una mayor vinculación con el aparato productivo. Así, el continente ha logrado responder a las exigencias del siglo XXI sin desvirtuar los valores originales que dieron forma a su sistema universitario.

La experiencia latinoamericana: entre aspiraciones de excelencia y desafíos estructurales

En América Latina, el panorama es más complejo. Las influencias múltiples, los desarrollos institucionales desiguales y los persistentes desafíos estructurales han condicionado la asimilación de este legado universitario. A lo largo de su historia, la región ha entrelazado elementos de la tradición germánica con componentes del modelo napoleónico francés y, en tiempos más recientes, con características del sistema anglosajón.

Argentina constituye uno de los casos más representativos de esta evolución. La Universidad de Buenos Aires, fundada en 1821 bajo inspiración francesa, fue incorporando de forma progresiva una visión centrada en la investigación. Este proceso permitió su consolidación como una de las pocas instituciones latinoamericanas ubicadas entre las cien mejores del mundo según el QS World University Rankings. No obstante, la influencia del ideario humboldtiano no se ha limitado a esta universidad, sino que ha permeado de forma creciente el conjunto del sistema universitario argentino, especialmente en las instituciones del interior del país. Desde mediados del siglo XX, en particular a partir de la expansión impulsada en la década de 1950, se promovió la creación de nuevas universidades públicas en las regiones extraurbanas con el propósito de federalizar la educación superior y descentralizar el acceso al conocimiento. Instituciones como la Universidad Nacional de Córdoba, de fuerte raigambre reformista ligada al movimiento de 1918, se consolidaron como referentes en autonomía académica y compromiso social. A ellas se suman universidades con destacada trayectoria como la Universidad Nacional de La Plata, la Universidad Nacional de Rosario, la Universidad Nacional de Tucumán y la Universidad Nacional del Litoral, que han desarrollado capacidades investigativas importantes a pesar de las restricciones presupuestarias.

Más recientemente, universidades del norte y del noroeste argentino —como la misma Universidad Nacional de Tucumán (UNT), la Universidad Nacional de Salta o la Universidad Nacional del Nordeste— han buscado establecer agendas científicas vinculadas a problemáticas regionales, como el desarrollo

sostenible, las transformaciones socioculturales o la innovación tecnológica con base local. Estas instituciones ofrecen ejemplos elocuentes de cómo los principios de integración entre docencia e investigación pueden adaptarse a realidades territoriales específicas, vinculando el conocimiento académico con las necesidades sociales. Un ejemplo de ello fue la creación de la UNT, a inicios del siglo XX, para contribuir desde el conocimiento ilustrado con la actividad agroindustrial de Tucumán y de la región. Esta visión industrialista de esa época, que dio origen a la mayor universidad del norte del país, a su vez impulsó la creación de cuatro universidades más en las provincias de Catamarca, Salta, Jujuy y Santiago del Estero. Este entramado de universidades del interior de la R. Argentina ha contribuido a la consolidación de un sistema público y no arancelado que, aunque heterogéneo, se sostiene sobre pilares como la autonomía, el cogobierno, la libertad académica y la vocación científica. Una red de universidades nacionales, integrada por más de sesenta instituciones, representa hoy una manifestación institucional de este modelo descentralizado y plural.

En conjunto, las universidades argentinas —tanto las de mayor antigüedad como las de más reciente fundación— han procurado articular una formación académica amplia con la generación de conocimiento, aun en medio de tensiones presupuestarias, demandas sociales cambiantes y presiones del mercado laboral. El resultado ha sido un sistema que, con matices, encarna una de las aproximaciones más extensas y ambiciosas a los ideales heredados de Humboldt en América Latina.

Chile, por su parte, ha conformado un sistema universitario sólido, articulando instituciones públicas y privadas de alta calidad. La Pontificia Universidad Católica de Chile se ha posicionado como la mejor de la región según diversas clasificaciones internacionales. El país cuenta con 30 universidades reconocidas globalmente, lo que constituye una notable densidad institucional en relación con su población.

Brasil, como principal economía de la región, ha desarrollado un sistema amplio y diverso. La Universidad de São Paulo, con fuerte orientación investigativa, encarna muchos de los principios del enfoque germánico, y su red de universidades —cincuenta y dos de ellas incluidas en rankings internacionales— refleja

una expansión considerable en términos de producción científica y formación de posgrado. Sin embargo, en el conjunto de América Latina persisten obstáculos estructurales que dificultan una implementación plena de este modelo universitario. Entre ellos se destacan las limitaciones presupuestarias, la masificación de la matrícula, la tensión entre formación profesional inmediata y desarrollo científico de largo plazo, así como la dificultad para retener recursos humanos calificados. Estas condiciones generan un terreno fértil pero inestable, en el que conviven aspiraciones de excelencia con necesidades urgentes de democratización y acceso.

Las instituciones que más se acercan a los postulados originales suelen ser las universidades públicas de investigación más antiguas y consolidadas de cada país, como la UBA en Argentina, la USP en Brasil, la Universidad de Chile, la UNAM en México y algunas universidades privadas de élite como la PUC Chile. Todas ellas han logrado articular una oferta educativa amplia con una producción científica significativa, aunque con grados diversos de integración y resultados.

Primera conclusión: adaptabilidad y permanencia del modelo humboldtiano

La expansión global de este paradigma universitario evidencia tanto su vigencia como su capacidad de adaptación. Cada región ha desarrollado una lectura particular: Estados Unidos ha privilegiado su relación con el aparato productivo y la transferencia tecnológica; Europa ha preservado los principios originales mientras avanza hacia la internacionalización; América Latina, por su parte, ha intentado armonizar la excelencia académica con la equidad educativa. El éxito relativo de estas apropiaciones indica que no se trata de un esquema rígido, sino de un marco conceptual lo suficientemente flexible como para incorporar elementos contextuales sin perder su esencia: la articulación entre enseñanza e investigación como base para una formación superior de calidad. Esta adaptabilidad explica su persistencia como referente en un mundo académico en permanente transformación.

El lado oscuro

La Universidad de Berlín. El colapso del modelo humboldtiano

La Universidad de Berlín se presentó en la primera parte de esta nota como el origen de lo virtuoso y novedoso del modelo humboldtiano. Como contracara, esta misma universidad representa el caso más dramático de aniquilación institucional por parte de un régimen totalitario. Este modelo, fundado en los principios de *Lehrfreiheit* y *Lernfreiheit* (Libertad para enseñar y Libertad para aprender), constituyó durante más de un siglo el paradigma de la educación superior moderna. Su destrucción por el nazismo no fue meramente una consecuencia colateral del autoritarismo, sino una estrategia deliberada de control ideológico que reconocía en la universidad un obstáculo fundamental para la hegemonía totalitaria. La purga de 1933 no se limitó a la expulsión de académicos judíos o políticamente disidentes; implicó la destrucción sistemática del *ethos* académico que había convertido a Alemania en el epicentro mundial de la innovación científica. La quema de libros, la reconfiguración curricular y la subordinación de la investigación a los imperativos del estado racista transformaron una institución de excelencia en un aparato de propaganda. Esta metamorfosis revela cómo la captura ideológica puede destruir en pocos años lo que tardó más de un siglo en construirse. El caso berlinés demuestra que la tradición académica, por sólida que parezca, no constituye una barrera infranqueable contra la barbarie institucional. La facilidad con que el régimen nazi logró reconvertir a destacados intelectuales en funcionarios del aparato ideológico ilustra la fragilidad de los valores académicos cuando no cuentan con mecanismos institucionales robustos de protección.

Harvard. De bastión democrático a paradigma de la erosión institucional contemporánea

La Universidad de Harvard representa otro caso paradigmático de transformación institucional que ilustra cómo las amenazas a la autonomía universitaria han evolucionado desde las intervenciones autoritarias directas hacia formas más sutiles, pero igualmente corrosivas de degradación académica. Desde su fundación en 1636, la institución se erigió como bastión de valores democráticos y

libertad intelectual, desempeñando roles cruciales en los momentos más críticos de la historia estadounidense: desde servir como sede del primer cuartel general de Washington durante la revolución norteamericana hasta liderar las investigaciones científicas y tecnológicas que resultaron decisivas en conflictos bélicos y en la carrera armamentística con la Unión Soviética. La trayectoria histórica de Harvard como modelo de la élite estadounidense alcanzó su apogeo tras la Segunda Guerra Mundial, cuando la universidad consolidó su posición creando instituciones especializadas como la Kennedy School, diseñada para formar cuadros de excelencia en asuntos gubernamentales y políticas públicas. Esta época dorada estableció a Harvard como el arquetipo de la universidad de investigación de clase mundial, combinando prestigio académico con influencia política y social. Sin embargo, el caso harvardiano revela un patrón de erosión institucional cualitativamente diferente al observado en universidades sometidas a regímenes autoritarios. A diferencia de las intervenciones externas y dramáticas que caracterizaron la decadencia de instituciones como la Universidad de Berlín, la Universidad de Harvard enfrenta un proceso de degradación endógena generado por la confluencia de múltiples presiones aparentemente legítimas: mercantilización, politización y demandas sociales diversas.

Esta "crisis de identidad" contemporánea refleja tensiones estructurales más profundas en el modelo universitario del siglo XXI. La creciente dependencia de fondos federales y donaciones corporativas ha desgastado la capacidad institucional para mantener posiciones académicas independientes cuando estas resultan políticamente inconvenientes o económicamente costosas. Simultáneamente, la presión por la relevancia social inmediata y las demandas de diversos grupos de interés han fragmentado la misión universitaria tradicional, subordinando la búsqueda desinteresada del conocimiento a imperativos de justicia social, pertinencia económica y corrección política. En este caso, la paradoja radica en que, manteniendo formalmente su estatus como una de las universidades más prestigiosas del mundo, la institución ha experimentado un proceso de deslegitimación en sectores significativos de la sociedad estadounidense. La percepción creciente de

Harvard como símbolo del poder elitista, alejado de las preocupaciones populares y las clases medias, ha generado una disociación crítica entre su prestigio global y su legitimidad doméstica. Esta tensión se manifiesta en ataques sistemáticos que cuestionan tanto su narrativa histórica heroica como su relevancia contemporánea, frecuentemente desde perspectivas ideologizadas que demandan revisiones del pasado institucional y mayor equidad en términos que a menudo comprometen los estándares académicos tradicionales.

El fenómeno que ocurre con Harvard demuestra que la amenaza a la libertad académica no requiere necesariamente la intervención de regímenes autoritarios externos. Por el contrario, puede emerger orgánicamente de la propia dinámica democrática cuando las instituciones carecen de mecanismos efectivos para preservar su autonomía frente a presiones sociales y políticas que, siendo formalmente legítimas, resultan potencialmente destructivas para la misión académica fundamental. Esta erosión gradual se manifiesta en múltiples dimensiones: la creciente presión sobre docentes y estudiantes para conformarse con ortodoxias ideológicas específicas, el control político indirecto de las políticas educativas a través de mecanismos de financiamiento condicionado, y los ataques mediáticos sistemáticos contra la libertad de investigación y el pensamiento crítico independiente. La mercantilización progresiva ha transformado la educación superior en un bien de consumo sujeto a las lógicas del mercado, mientras que la politización ha subordinado la búsqueda de la verdad a consideraciones de conveniencia política.

La experiencia en Harvard revela que las universidades de élite no son inmunes a procesos de corrupción institucional y control ideológico, aunque estos adopten formas más sofisticadas que las intervenciones autoritarias tradicionales. La historia demuestra que cuando las fuerzas autoritarias o populistas logran instrumentalizar las instituciones académicas, estas se transforman inevitablemente en meros aparatos de control o propaganda, perdiendo su capacidad esencial de generar conocimiento independiente y formar ciudadanos críticos.

La advertencia que emerge del caso harvardiano trasciende las fronteras

estadounidenses: si una nación no desarrolla mecanismos robustos para proteger y defender sus universidades contra estas nuevas formas de instrumentalización, estas instituciones pueden ser destruidas desde adentro, comprometiendo irremediablemente la capacidad nacional de innovar, liderar intelectualmente y atraer talento internacional. La pérdida de instituciones académicas genuinamente autónomas equivale a la pérdida de la capacidad de progreso sostenible y de influencia global legítima.

El dilema fundamental que plantea Harvard es si una universidad que históricamente encarnó el modelo de libertad académica puede mantener esa libertad cuando enfrenta simultáneamente la presión de intereses políticos divergentes, la dependencia de recursos externos condicionados, y las demandas de relevancia social inmediata. La respuesta a este interrogante determinará no solo el futuro de Harvard como institución, sino el destino del modelo universitario de investigación en sociedades democráticas avanzadas.

La Universidad Argentina. Entre la tradición reformista y las amenazas contemporáneas

La universidad argentina presenta un caso singular en el panorama internacional: un sistema que ha demostrado notable capacidad de resistencia histórica ante intervenciones autoritarias, pero que enfrenta vulnerabilidades estructurales que lo exponen a nuevas formas de manipulación política e ideológica. Esta paradoja institucional refleja tanto las fortalezas heredadas de la tradición reformista como las fragilidades inherentes a un modelo de financiamiento público casi exclusivo en contextos de inestabilidad política crónica.

La experiencia histórica argentina anticipa los patrones observados en casos internacionales paradigmáticos. La "noche de los bastones largos" (1966) constituyó un episodio fundacional que demostró la vulnerabilidad del sistema universitario ante la violencia estatal, mientras que la dictadura militar (1976-1983) implementó una versión local de las purgas ideológicas observadas en la Universidad de Berlín: persecución sistemática de académicos, censura curricular, destrucción de bibliotecas y subordinación institucional a imperativos político-represivos.

Sin embargo, a diferencia de otros casos históricos, la transición democrática permitió

una reconstrucción relativamente exitosa del sistema universitario, revelando reservas institucionales y culturales significativas. La autonomía constitucionalmente consagrada, la gratuidad universal y la tradición reformista heredada de 1918 han funcionado como mecanismos de protección y legitimación social que distinguen al modelo argentino de experiencias internacionales similares. No obstante, esta resiliencia histórica no garantiza inmunidad ante las amenazas contemporáneas. El sistema universitario argentino enfrenta vulnerabilidades estructurales que recuerdan –salvando las distancias– tanto los mecanismos de control observados en Berlín como los procesos de erosión gradual que caracterizan la experiencia harvardiana. La dependencia presupuestaria casi exclusiva del Estado expone a las universidades a presiones gubernamentales directas e indirectas, mientras que la situación política estructuralmente frágil genera discontinuidades que comprometen la planificación académica de largo plazo. Las amenazas emergentes adoptan formas más sofisticadas que las intervenciones autoritarias tradicionales. La mercantilización encubierta, mediante la creciente dependencia de recursos externos condicionados, introduce lógicas de mercado que pueden comprometer la independencia académica. Simultáneamente, la politización curricular y los debates ideológicos sobre contenidos educativos transforman el conocimiento en campo de batalla político, erosionando la autoridad epistémica de las instituciones. El populismo anti-intelectual contemporáneo presenta desafíos particulares: el cuestionamiento sistemático de la experticia académica, la desvalorización del conocimiento especializado y la promoción de formas alternativas de "saber popular" socavan los fundamentos epistemológicos del sistema universitario. Esta tendencia, combinada con la precarización laboral creciente y la crisis económica recurrente, genera condiciones propicias para la cooptación ideológica y el aprovechamiento político.

La fragilidad del modelo argentino se evidencia en su dependencia de consensos políticos volátiles y en la ausencia de mecanismos robustos de protección financiera que trasciendan los ciclos electorales. El desafío fundamental consiste en preservar las conquistas históricas del sistema universitario

nacional mientras se desarrollan mecanismos de protección adaptados a las amenazas del siglo XXI. Esto requiere la construcción de consensos sociales amplios sobre el valor de la universidad pública, la diversificación del financiamiento sin comprometer el carácter público del sistema y la renovación de tradiciones académicas capaces de resistir tanto la intervención autoritaria como la erosión gradual generada por presiones democráticas mal encauzadas. La supervivencia del modelo universitario argentino como espacio de libertad intelectual depende de esta capacidad de adaptación creativa.

Segunda conclusión y final. La universidad como patrimonio de la civilización

La historia de las universidades de Berlín, Harvard y de la Argentina misma demuestra que la excelencia universitaria no es un estado natural sino una construcción frágil que requiere defensa constante. Las universidades argentinas, herederas de tradiciones académicas valiosas pero enfrentadas a amenazas inéditas, se encuentran en un momento crucial de su desarrollo histórico. La preservación de la autonomía universitaria no constituye meramente un interés corporativo de la comunidad académica, sino una condición necesaria para el mantenimiento de sociedades democráticas y prósperas. Las universidades libres son repositorios de memoria civilizatoria, espacios de creatividad intelectual y mecanismos de movilidad social que trascienden los intereses partidarios o ideológicos específicos. El desafío contemporáneo consiste en desarrollar formas de autonomía universitaria que sean simultáneamente robustas frente a las presiones externas e internas y responsables ante las demandas sociales legítimas. Esto requiere la construcción de consensos amplios sobre el valor de la universidad pública, la implementación de reformas institucionales que fortalezcan la independencia académica, y la formación de nuevas generaciones de académicos comprometidos con la defensa de principios universitarios fundamentales.

La experiencia histórica enseña que las instituciones universitarias pueden ser destruidas en pocos años, pero requieren décadas para ser reconstruidas. La preservación de las universidades argentinas como espacios de libertad intelectual y excelencia académica constituye, por lo tanto,

una responsabilidad no solo de la comunidad universitaria sino de la sociedad en su conjunto. El futuro de la democracia argentina y su capacidad de desarrollo dependen, en medida significativa, de nuestra capacidad colectiva para defender el patrimonio universitario heredado y adaptarlo creativamente a los desafíos del siglo XXI. La pregunta que emerge de este análisis no es si las universidades argentinas enfrentarán amenazas a su autonomía —la historia demuestra que estas amenazas son inevitables— sino si seremos capaces de desarrollar los mecanismos institucionales, culturales y sociales necesarios para resistirlas exitosamente. La respuesta a esta pregunta determinará no solo el futuro del sistema universitario argentino, sino el destino de la República Argentina como sociedad democrática y próspera.



Figura 3: Fachada de la sede central de la Universidad Nacional de Tucumán. Imagen de Wikipedia.

AGRADECIMIENTOS

Se utilizó ChatGPT (OpenAI) para explorar formulaciones alternativas, reestructurar algunos pasajes y realizar revisiones de estilo. Todas las decisiones conceptuales y autorales fueron tomadas por los autores humanos.

BIBLIOGRAFÍA

- Altbach, P.G., Reisberg, L. & Rumbley, L. E. (2019). Trends in Global Higher Education: Tracking an Academic Revolution. Rotterdam: Brill Sense.
- Brunner, J. J. & Miranda, D. A. (2016). Educación Superior en Iberoamérica: Informe 2016. Santiago: CINDA - Universia.
- Douglass, J.A. (2021). Neo-Nationalism and Universities: Populists, Autocrats, and the Future of Higher Education. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Gay, C. & Ackman, B. (2024). 'The Harvard Crisis: Academic Freedom, DEI, and Institutional Governance', The Chronicle of Higher Education.
- Hazelkorn, E. (2015). Rankings and the Reshaping of Higher Education: The Battle for World-Class Excellence. 2nd ed. London: Palgrave Macmillan.
- QS World University Rankings (2024). QS World University Rankings 2025. London: QS Quacquarelli Symonds. Disponible en: <https://www.topuniversities.com>

Secretaría de Políticas Universitarias (2023). Anuario de Estadísticas Universitarias - Argentina 2022. Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación.

Times Higher Education (2024). World University Rankings 2024. London: Times Higher Education. Disponible en: <https://www.timeshighereducation.com>

UNESCO Institute for Statistics (2023). Global Education Monitoring Report 2023. Paris: UNESCO Publishing.

AUTORES

NIEVA, Nicolás

Ingeniero Electricista orientación Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT); Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales y Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales del Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica. Profesor Titular del Departamento de Física de la FACET-UNT. Actual Secretario de Posgrado, Investigación e Innovación de la FACET-UNT. Director del Instituto de Física del NOA (INFINOA-CONICET-UNT).

nnieva@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0003-2190-5928

CABRERA, Miguel

Ingeniero Electricista orientación Electrónica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT). Doctor en Física de la Atmósfera de la FACET-UNT. Profesor Asociado del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación de la FACET-UNT. Actual Decano de la FACET-UNT.

mcabrera@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0001-8546-6819

cet - REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

cet - Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería, es editada por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Está orientada a difundir en el noroeste argentino, en el país y en el extranjero, artículos de investigación científica y tecnológica, de docencia y de extensión sobre temas de las ingenierías y sus ciencias básicas.

Es una publicación indexada en Latindex, de acceso gratuito en internet y de larga tradición como revista institucional universitaria. Nuestra revista invita a docentes, investigadores, alumnos y personal de universidades nacionales e internacionales y de instituciones académicas y de investigación y desarrollo en ciencia y tecnología, a realizar sus aportes y proponer sus trabajos. Se aceptan trabajos originales, comunicaciones cortas y revisiones en las áreas de las ingenierías y las ciencias básicas, matemática, física y química. Los trabajos en investigaciones multidisciplinarias son especialmente bienvenidos.

La revista cuenta con distintas categorías, clasificadas según el tipo de trabajo presentado. Las categorías corresponden a trabajos de: Investigación, Desarrollo e Innovación; Docencia; Extensión; Informe Técnico; Notas, Arte y Opinión; Homenajes; Comunicaciones Cortas.

Los trabajos presentados serán sometidos a su revisión según indicación del Comité Editorial propio de la Revista. Los artículos son enviados para su revisión omitiendo el nombre de los autores y sus filiaciones. Son evaluados por uno o más evaluadores de reconocida autoridad en el área temática correspondiente, externos o internos, seleccionados por miembros del Comité Editorial. Aquellos actúan de acuerdo con una pauta de evaluación debidamente notificada. Las observaciones y comentarios sobre los trabajos son comunicadas al autor principal dentro de los tres meses de la recepción del escrito. La decisión final concerniente a la aprobación de los artículos pertenece sólo a los editores.

Los textos originales se reciben bajo la suposición de que no están simultáneamente considerados para ser publicados en otra revista. Una característica que deben tener estos trabajos es que deben ser inéditos, es decir, que no hayan sido publicados en ningún otro medio, siendo responsabilidad de los autores el cumplir con este requisito.

La admisión del trabajo está basada en el significado, originalidad y validez del material presentado, el cual deberá cumplir con las pautas indicadas bajo el título "Instrucciones para autores". Los autores serán notificados acerca de la aceptación o no de dicho trabajo dentro del plazo establecido por la dirección de la Revista.

Los autores son los únicos responsables por las expresiones vertidas en sus trabajos.

¡Quedamos a la espera del envío de su trabajo!

INSTRUCCIONES PARA AUTORES PARA PUBLICAR EN LA REVISTA:

Categorías de trabajos: “Investigación, Desarrollo e Innovación” (hasta 16 páginas). “Docencia”, “Extensión”, “Informe Técnico”, “Notas, Arte y Opinión” (hasta 12 páginas), “Homenajes” (hasta 6 páginas). “Comunicaciones Cortas” (máximo 1000 palabras, 1 tabla/gráfico y 1 foto)

Formato del documento. Configuración básica: Archivo: Word o compatible. Hoja: DIN A4 (210 x 297 mm). Márgenes: 2,5 cm en todos los lados. Interlineado: simple. Tipografía: Arial 10 pt. Columnas: 2. Párrafos: sin sangría.

Uso de inteligencia artificial. El uso de texto generado por inteligencia artificial (IA) en un artículo debe ser declarado en la sección de agradecimientos. Las secciones del artículo que utilicen texto generado por IA deben incluir una cita al sistema de IA utilizado para generar el texto.

Envío del Trabajo. Enviar por E-mail a: revista@herrera.unt.edu.ar. Asunto: “Apellido del primer autor – Categoría”. Ejemplo: “Pérez – Investigación, Desarrollo e Innovación”. Adjuntar documento Word o compatible del artículo completo y un archivo en PDF del mismo.

Estructura del artículo: a) Título, máximo 100 caracteres (con espacios). Sin abreviaturas. claro e informativo. En español e inglés (para las categorías “Investigación, Desarrollo e Innovación”, “Docencia”, “Extensión” e “Informe Técnico”). b) Autores y filiación. Incluir para cada autor: nombre completo, institución completa (sin siglas ni abreviaturas), domicilio y código postal, E-mail institucional, Código ORCID.

Requisito obligatorio para el autor que envía el trabajo: El autor que envía el trabajo debe tener un ID de ORCID asociado a su cuenta. El perfil de ORCID debe ser públicamente visible y estar completo. El autor designado como autor correspondiente en el sistema de envío será el contacto principal para el artículo y será responsable de aprobar las pruebas de imprenta si el artículo es aceptado para publicación.

Ejemplo: Lopez, Juan¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Departamento de Física. Av. Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán (4000). R. Argentina. lopezj@herrera.unt.edu.ar. ORCID: 0000-0000-0000-0000

Los artículos de las categorías “Investigación, Desarrollo e Innovación”, “Docencia”, “Extensión” e “Informe Técnico” deben tener Resumen y Palabras Clave, en castellano y en inglés. Resumen en español: máximo 200 palabras. Abstract en inglés: máximo 200 palabras. El resumen debe ser informativo, no descriptivo, Sin figuras, ecuaciones ni detalles experimentales triviales. Tres palabras clave en cada idioma.

Cuerpo del Artículo. Secciones principales sugeridas para las mismas categorías del párrafo anterior. Introducción: motivaciones, objetivos y revisión de literatura actualizada. Desarrollo o Material y Métodos: experimentos, técnicas, procedimientos (con detalle suficiente para ser reproducible). Resultados: presentación de datos. Discusión: interpretación de resultados. Conclusiones: síntesis final. Agradecimientos: reconocimientos institucionales y financieros. Referencias y Bibliografía.

Referencias y Bibliografía. En el texto del artículo (sistema Harvard): un autor: Jones (1999). Dos autores: Fisher y Hollemberg (1963). Tres o más: Fisher et al. (1980). Al final del documento:

Artículo de revista: Hibbs, R. G., Burch, G. E., Phillips, J. H. (1958). “The fine structure of the small blood vessels of normal dermis and subcutis”, *Am Heart J.*, Vol. 56, pp. 662-670.

Libro: Happel, J. and Brenner, H. (eds.) (1985) *Low Reynolds Number Hydrodynamics with Special Applications to Particulate Media*. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, E.E.U.U.

Capítulo de libro: Green, K.P., Smith, P. and Martin, K. (1993) Exitatory amino acids, En: *Glutamate Receptors*, (Jones, T., ed.), J. Wiley Press, New York, E.E.U.U., pp. 24-59.

Tesis: Ramírez, M. (2004) “Violencia en relaciones de pareja y conductas autodestructivas en mujeres”. Tesis. Maestría en Psicología Clínica y Psicoterapia. Universidad Iberoamericana de Puebla.

Información biográfica de los autores. Máximo 160 palabras por autor. Incluir E-mail e institución donde se realizó el trabajo. Agregar fechas.

ELEMENTOS VISUALES: FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

Numeradas progresivamente

Presentarlas fuera del texto y con referencia de ubicación en el texto

Citar en el cuerpo del texto

Originales o con permiso del editor

Ancho: 8 cm (una columna) o 17 cm (dos columnas)

Resolución adecuada para publicación digital

Rótulos legibles (mínimo 10 pt)

Epígrafes en hoja aparte

TABLAS

Crear con procesador de texto

Numeradas progresivamente

Presentarlas fuera del texto y con referencia de ubicación en el texto

Citar en el cuerpo del texto

Epígrafes en hoja aparte

DETALLES IMPORTANTES

No numerar títulos ni subtítulos

Unidades de magnitud sin punto

Fórmulas numeradas progresivamente entre paréntesis a la derecha

Las abreviaturas de revistas deben consultarse en: <http://library.caltech.edu/reference/abbreviations/>

NOTAS FINALES

Los editores pueden sugerir correcciones de idioma, modificar la categoría del trabajo o introducir correcciones menores cuando sea necesario.

SITIO WEB DE LA REVISTA

<https://www.facet.unt.edu.ar/revistacet/>