

Proxectos INOU 2023

Investigación aplicada na provincia de Ourense

Coordinación:

Vicerreitoría do
Campus de Ourense-Campus Auga

Proxectos INOU 2023.

Investigación aplicada na provincia de Ourense

Coordinación:

Vicerreitoría do
Campus de Ourense-Campus Auga

Ourense, 2024

Universidade de Vigo • Campus de Ourense

Proxectos INOU 2023. Investigación aplicada na provincia de Ourense

Autores/as Investigadores/as principais:

Astray Dopazo, Gonzalo
Ferreira Santos, Pedro Miguel
Figueiredo González, María
Méndez Quintas, Eduardo
Mociño González, María Isabel
Orgeira Crespo, Pedro
Pérez Paz, Alicia
Ruano Ordás, David
Sánchez Sello, Francisco Javier
Valente Da Silva Couto, María Joao
Vázquez Domínguez, Marta
Velasco Martínez, Luis

Coordinación:

Vicerreitoría do Campus de Ourense-Campus Auga

Comisión de Avaliación:

Araújo Nespereira, Pedro Antonio
Fernández Gil, César Manuel
Fernández López, Roberto Ignacio
López Díaz, María
Membriela Iglesia, Pedro
Méndez Penín, Arturo José
Rodríguez Rajo, Francisco Javier

Nº de páxinas: 197

ISBN: 978-84-1188-035-0

Edición

Vicerreitoría do Campus de Ourense - Campus Auga

www.uvigo.gal/campus/ourense-campus-auga

© Universidade de Vigo

Maquetación

Rodi Artes Gráficas, S. L.

Reservados todos os dereitos. Nin a totalidade nin parte deste libro pode reproducirse ou transmitirse por ningún procedemento electrónico ou mecánico, incluíndo fotocopia, gravación magnética ou calquera almacenamento de información e sistema de recuperación, sen o permiso previo e por escrito das persoas titulares do copyright.

Índice

Prólogo	7
Crecedemento económico e contaminación, unha aproximación dende a aprendizaxe automática	9
Estratexias para a xestión sostible de residuos vitivinícolas na provincia de Ourense	31
Os primeiros poboadores da provincia de Ourense: o xacemento paleolítico da Piteira (Toén, Ourense)	63
Caracterización do uso do espazo escolar mediante posicionamento en tempo real do alumnado a través de dispositivo de localización UWB	95
Mostaza máis ca un mollo Compostos bioactivos e a súa repercusión na saúde	119
SADiSiR: sistema de automatización do diagnóstico a partir de signos radiolóxicos	151
Coñecendo o clima local: un soporte para a concienciación medioambiental na educación secundaria	169

PRÓLOGO

Francisco Javier Rodríguez Rajo

Vicerreitor do Campus de Ourense-Campus Auga

Dentro dos tres principais piares nos cales se basea a nosa universidade (docencia, investigación e transferencia), cremos firmemente no poder da transferencia e, sobre todo, cara ao sector socioeconómico que nos rodea. Esta facilita que os avances cheguen ás empresas e ás persoas dun xeito práctico e eficaz como ferramenta fundamental para a transformación que se está a producir en todos os ámbitos da nosa sociedade.

Nun exemplo de colaboración interinstitucional, que persegue a suma de esforzos para multiplicar resultados na procura dunha mellor calidade de vida das e dos habitantes da nosa contorna, a Deputación Provincial de Ourense e o Campus Auga da Universidade de Vigo traballan no fornecemento da investigación do campus a través dos convenios de colaboración asinados anualmente dende o ano 2003. Estes, entre outras cousas, contribúen ao financiamento desta convocatoria de Axudas a grupos de investigación do Campus de Ourense (INOUE).

Nesta 20.a edición continuamos a traballar na senda da colaboración entre grupos de investigación de diferentes ámbitos de coñecemento para achegarlles solucións aos desafíos, presentes e futuros, de Galicia. Vivimos nunha época marcada por cambios rápidos e profundos en todos os sectores, polo que tratar os retos dende un punto de vista multidisciplinar representa a chave para que ideas, talento e experiencia conflúan na inspiración de proxectos profesionais e solucións baseadas na innovación, para así axudar a construír un mundo máis sostible, máis inclusivo e máis xusto. Nesta convocatoria seleccionáronse oito proxectos de investigación e potenciouse a coordinación entre diferentes ámbitos, que abranguen importantes eixes do desenvolvemento da nosa provincia como a sustentabilidade do medio ambiente, a posta en valor do noso patrimonio ou a mellora do benestar e da saúde dende un punto de vista tecnolóxico.

No eido do medio ambiente avaliáronse as implicacións do crecemento económico nos procesos de contaminación a través dunha aproximación dende a aprendizaxe automática, propuxéronse diversas estratexias para a xestión

sustentable de refugallos vitivinícolas na provincia de Ourense e establecéronse medidas de concienciación medioambiental na educación secundaria tendo en conta as variacións do clima da nosa contorna. Tamén se puxo en valor o noso patrimonio mediante o estudo da importancia que tivo a presenza dos primeiros poboadores da provincia de Ourense no xacemento paleolítico da Piteira (Toén, Ourense). No campo da saúde deseñouse un sistema de automatización da diagnose a partir de signos radiolóxicos, ferramenta que, mediante a combinación de técnicas de intelixencia artificial e modelos de aprendizaxe automática, infire automaticamente as diagnoses médicas máis probables a partir dos signos presentes nunha imaxe de raios X. Tamén se avaliou a importancia de novos cultivos para a nosa provincia, como o da mostaza, que nos permite a extracción de novos compostos bioactivos con alta repercusión na saúde. Finalmente, deseñáronse novas ferramentas tecnolóxicas para mellorar a atención á diversidade nas nosas aulas como a caracterización do uso do espazo escolar mediante posicionamento en tempo real do alumnado a través do dispositivo de localización uwb.

A Vicerreitoría do Campus de Ourense, xunto coa Vicerreitoría de Investigación, Transferencia e Innovación da Universidade de Vigo, queremos agradecerlle o apoio á Deputación Provincial de Ourense, así como o esforzo realizado polas investigadoras e investigadores que participaron nesta nova edición das axudas INOU. Así, froito desta colaboración presentáronse traballos de gran calidade e de moito proveito e interese para todo o tecido socioeconómico da nosa provincia.

Crecemento económico e contaminación, unha aproximación dende a aprendizaxe automática

G. Astray,¹ C. Pérez Lamela,² A. Cid Samamed,¹ N. Vila Romeu,¹ e L. Velasco Martínez,³

¹Universidade de Vigo. Departamento de Química Física.

Facultade de Ciencias. Campus de Ourense

²Universidade de Vigo. Departamento de Química Analítica e Alimentaria.

Facultade de Ciencias. Campus de Ourense

³Universidade de Vigo. Departamento de Historia, Arte e Xeografía.

Facultade de Historia. Campus de Ourense

gastray@uvigo.gal, conchipl@uvigo.gal, acids@uvigo.gal, nvromeu@uvigo.gal, [luis.velasco.martinez@](mailto:luis.velasco.martinez@uvigo.gal)

uvigo.gal

Resumo

Nesta investigación propóñense diferentes modelos de aprendizaxe automática baseados no bosque aleatorio, na máquina de vector de soporte e na rede neuronal artificial, para tratar de relacionar diferentes variables socioeconómicas con variables de calidade do aire na provincia de Ourense. Os diferentes enfoques realizados proporcionaron axustes de predición baixos, debido ao problema de localizar series temporais grandes e datos cun intervalo de recollida adecuado. A mellora destes modelos pasa por atopar fontes de información máis amplas, a inclusión de novas variables, a transformación doutras e o estudo de diferentes combinacións de hiperparámetros para que os modelos sexan capaces de predicir de forma máis adecuada.

Palabras clave: calidade do aire, variables socioeconómicas, aprendizaxe automática, intelixencia artificial e curva de Kuznets ambiental.

1 Introducción

Nas últimas décadas houbo unha forte polémica en canto ao intento de relacionar o crecemento económico e a calidade ambiental [1], situación que se incrementou debido ao crecente interese mostrado pola cidadanía e polos gobernos pola deterioración ambiental como consecuencia do crecemento económico [2]. Segundo Capó Parrilla [1], a Conferencia das Nacións Unidas sobre o Medio Ambiente organizada en Estocolmo no ano 1972 podería considerarse o punto determinante da conciencia internacional sobre a posibilidade da existencia dunha relación entre o problema ambiental e o desenvolvemento económico. Este xerme deu lugar á aparición dunha intensa actividade investigadora dentro da que se podía destacar o informe «The Limits to Growth» de Meadows *et al.* [3], no que se recollen e analizan os importantes impactos ambientais que son consecuencia do desenvolvemento económico [1]. Anos antes, en 1955, na publicación «Economic growth and income inequality», de Simon Kuznets [4], presentábase a relación entre o crecemento económico (expresado en unidades de produto interior bruto –PIB– per cápita) e a distribución do ingreso, no cal demostraba que a desigualdade e o crecemento económico están relacionadas entre si presentando forma de U invertido [2]. Esta idea foi desenvolvida inicialmente para estudar a relación entre a renda per cápita e a desigualdade da renda; non obstante, conseguiu atraer gran popularidade cando se utilizou en estudos ambientais [5]. Estas novas liñas de investigación no ámbito ambiental tratan de determinar se existe esta forma de U invertido entre o crecemento económico e a calidade ambiental dun país ou rexión [2]. Segundo Correa Restrepo *et al.* [2], esta hipótese parece estar apoiada, en principio, pola evidencia empírica; non obstante, esta relación só se dá en casos concretos e ten unha forte relación co contaminante que se analiza, a densidade de poboación ou o grao de concentración da riqueza, entre outros factores. É a partir dos anos noventa cando comezan a aparecer estudos que indican que algúns contaminantes estarían relacionados coa renda per cápita dos países mediante unha curva de Kuznets ambiental (CKA) [1], ás veces tamén chamada curva ambiental de Kuznets (CAK) [6], curva medioambiental de Kuznets (CMK) [2] e en inglés *environmental Kuznets curve* (EKC) [5] (figura 1). Nesta curva obsérvase unha deterioración nas primeiras fases do crecemento económico ata chegar a un punto de cambio a partir do cal esta deterioración ambiental diminúe.

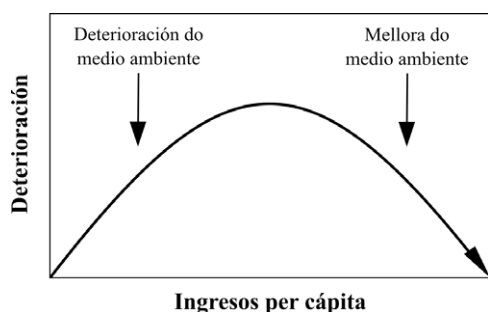


Figura 1. Curva de Kuznets ambiental. Adaptada de Yandle *et al.* [7]

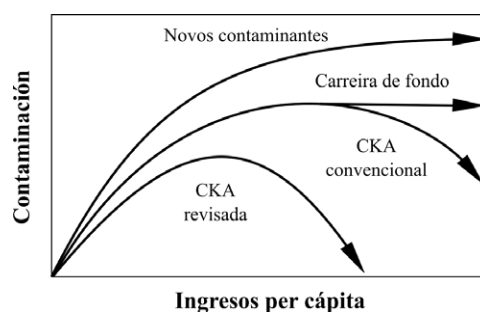


Figura 2. Forma das curvas de Kuznets ambiental en diferentes escenarios. Adaptada de Dasgupta *et al.* [8]

Esta relación en U invertido quedou demostrada polo traballo realizado por Grossman e Krueger [9], no cal evidencia o U invertido entre o ingreso per cápita e determinados contaminantes específicos [10].

Segundo recollen Zilio e Caraballo [10] son múltiples os argumentos teóricos que verifican a existencia da curva de Kuznets ambiental, que poden estar relacionados coa elasticidade ingreso, os efectos do comercio internacional ou os cambios na estrutura dos sistemas económicos debido ao proceso de crecedemento económico -este é o argumento máis habitual para explicar o descenso da CKA, que vén fundamentada nos efectos composición, escala e a tecnoloxía Grossman e Krueger (1991) [9]-. Tendo en conta isto, pódese afirmar que os países menos desenvolvidos estarán no lado esquerdo da curva [10], mentres que os países desenvolvidos deberían estar no lado dereito do máximo.

2 Estado da cuestión

Hai un gran número de estudos na literatura que intentan relacionar factores económicos e ambientais mediante unha curva de Kuznets ambiental. En 2001, Roca *et al.* [11] analizaron seis contaminantes atmosféricos (CH_4 , CO_2 , N_2O , compostos orgánicos volátiles distintos do metano, NO_x e SO_2). Os resultados obtidos parecen indicar que, agás o caso do SO_2 , non existe relación que indique que un maior nivel de ingresos redunde nun menor nivel de emisións [11]. Roca *et al.* [11] conclúen que non se debe pensar que os problemas ambientais van ser resoltos polo crecedemento

económico. Posteriormente, en 2013, Iglesias *et al.* [12] intentaron relacionar o produto interior bruto per cápita de España entre os anos 1850 e 2008 coas emisións de CO₂, e concluíron que a curva non se cumpre no caso de España [12]. En 2016, Falconí *et al.* [6] presentaron un traballo que analiza a existencia da curva de Kuznets ambiental en diferentes países usando valores per cápita de CO₂ e PIB. Os autores conclúen que só se observa a CKA nuns poucos países desenvolvidos pero que globalmente non se axusta a esta representación [6]. Máis adiante, Madaleno e Moutinho [13] tamén estudaron a validez da hipótese da curva de Kuznets ambiental usando medicións menos frecuentes da carga ambiental; neste caso, os tres principais gases de efecto invernadoiro (CO₂, N₂O e CH₄) e unha medida das emisións totais do efecto invernadoiro. Os autores conclúen que os resultados obtidos son sensibles aos modelos e ás medidas empregados [13]. Xa en 2022, Flores-Xolocotzi e Ceballos Pérez [14] realizaron un estudo para comprobar a hipótese da curva de Kuznets ambiental usando datos de residuos sólidos urbanos per cápita nun total de 208 municipios dos estados de México e Hidalgo. Segundo as conclusións comunicadas polos autores, non existe ningunha evidencia estatística significativa da presenza dunha curva de Kuznets considerando os datos per cápita de residuos sólidos urbanos e o produto interior bruto [14]. Posteriormente, en 2023, Aydin *et al.* [15] presentaron un estudo no que analizaron o impacto do consumo de enerxías renovables, das patentes verdes e dos investimentos en I+D enerxéticos na pegada ecolóxica en diferentes países da Unión Europea dende o punto de vista da hipótese da curva de Kuznets ambiental. Os autores concluíron que a hipótese só se cumpre no caso de Finlandia e puideron observar como o consumo de enerxías renovables provoca un aumento da pegada ecolóxica en Alemaña e en Italia [15]. Tamén neste mesmo ano, Bao e Lu [16], coñecedores da ampla atención que teñen as curvas de Kuznets ambientais por parte dos investigadores para indicar a dinámica entre economía e medio ambiente, propoñen aplicala á xestión dos residuos da construción. Para este fin, os investigadores utilizaron o produto interior bruto per cápita de 27 economías europeas e chegaron á conclusión de que o uso da curva de Kuznets ambiental se podería utilizar na xestión de residuos da construción, aínda que recomendan realizar futuros estudos para validar con máis forza esta aplicabilidade [16].

Ao centrar a procura nun nivel máis local, pódense atopar traballos baseados en datos españois e pódese mencionar o traballo realizado por Pablo-Romero *et al.*

[17], no que analizaron os efectos da renda e da temperatura sobre a demanda de electricidade residencial en Andalucía. Os autores concluíron que existe unha forma de N invertido entre a renda e o uso da electricidade, rexeitan a hipótese da curva de Kuznets ambiental e conclúen que o crecedemento económico non é suficiente por si só para controlar o consumo de enerxía eléctrica [17]. Posteriormente, Sesma-Martín e Puentes-Ajovín [18] analizaron a existencia dunha curva de Kuznets ambiental para o uso da auga no sector termoeléctrico español. A partir dos resultados, os investigadores expuxeron que existe unha relación directa entre a renda per cápita e a extracción de auga, e conclúen que as necesidades de auga se viron reducidas debido aos cambios nas tecnoloxías de xeración e ao uso de sistemas de refrixeración que implican o uso de gran cantidade de auga [18].

Pódese afirmar que, en vista das investigacións reportadas nestas liñas, a curva de Kuznets ambiental non permite explicar en todas as ocasións a relación entre factores económicos e niveis de contaminación. Debido a este problema, xurdiu un gran número de publicacións para criticar a adaptación do modelo orixinal de Kuznets [4] proposto por Grossman e Krueger [9]. Así, en 2004, nunha publicación de Stern [19], suxeriuse que a curva de Kuznets ambiental ten unha base estatística moi débil. O autor informa de que as diferentes evidencias presentadas ao longo do manuscrito indican que a base estatística na que se fundamenta a curva de Kuznets ambiental non é robusta e que a forma auténtica que presentaría a relación entre as variables emisións e ingresos probablemente teña máis que ver cos escenarios propostos por Dasgupta *et al.* [8]. Esta hipótese desenvolvida por Dasgupta *et al.* supón a aparición de diferentes escenarios nos que se poden producir cambios na curva por diversos motivos como: i) a aparición de novos contaminantes; ii) o estancamento en niveis máximos; ou mesmo iii) un escenario no que realmente se xera menos contaminación e esta comeza a caer cara a niveis de renda máis baixos (figura 2). Por outra banda, Stern [20] informou posteriormente, en 2017, de que aínda que a curva de Kuznets ambiental foi un enfoque importante na economía durante os últimos 25 anos, cómpre indicar que esta curva ambiental foi criticada dende as súas orixes. Ademais, hai que destacar a tese realizada por Díaz Vázquez [21], na que se analizan unha gran cantidade de estudos, e pódense observar as distintas formas que presenta a CKA tendo en conta diferentes indicadores de contaminación.

3 Proposta formulada

O estudo dunha posible relación entre as variables socioeconómicas e a calidade do aire xerou nos últimos anos un grande interese dentro da comunidade científica, debido sobre todo ás posibles implicacións en cuestións relacionadas coa saúde pública e co desenvolvemento sostible. Por outro lado, en vista dos problemas existentes para relacionar o crecemento económico e as variables ambientais usando unha curva Kuznets ambiental, propónse unha aproximación a esta cuestión mediante modelos de aprendizaxe automática.

A aprendizaxe automática é unha das ramas da intelixencia artificial, que van desde o procesamento da linguaxe natural ata a robótica [22]. Así mesmo, a rama da aprendizaxe automática divídese noutras ramas, dentro da que teríamos a aprendizaxe supervisada [22]. Dentro desta destacan os métodos de bosques aleatorios (RF, do inglés *random forest*), as máquinas de vectores soporte (SVM, do inglés *support vector machine*) e as redes neuronais artificiais (ANN, do inglés *artificial neural network*) [23].

Un bosque aleatorio é un algoritmo de aprendizaxe automática moi popular na educación de ciencia de datos e aplicacións industriais, e consiste nun conxunto de árbores de clasificación ou regresión [24] cuxo principal obxectivo é mellorar a precisión das árbores individuais e reducir o sobreaxuste. Este tipo de algoritmos son moi utilizados actualmente en diferentes campos da ciencia, como nas ciencias do solo [25] ou na farmacoloxía [26], entre outras.

Un algoritmo de máquina vector de soporte é un tipo de enfoque de aprendizaxe automática que, de acordo con Awad e Khanna [27] foi introducido por Boser *et al.* [28] en 1992. Este tipo de modelo é moi utilizado en diferentes campos da ciencia relacionados coa microeconomía [29] ou no sector enerxético [30].

Finalmente, unha rede neuronal artificial é unha técnica de aprendizaxe automática na que o obxectivo é desenvolver un sistema capaz de aprender e de mellorar automaticamente a partir da experiencia continua [31]. Segundo Ning *et al.* [32], as redes neuronais artificiais son modelos matemáticos capaces de imitar o comportamento das redes neuronais animais para procesar a información. Este tipo de algoritmos de aprendizaxe converteuse nas últimas décadas nunha ferramenta moi importante en campos de investigación tan diversos como a tecnoloxía dos alimentos [33], a enxeñaría [34] ou o tráfico aéreo [35].

4 Material e métodos

4.1 Datos socioeconómicos

A recollida de datos socioeconómicos que se utilizarán para desenvolver os modelos de aprendizaxe automática realizouse en diferentes páxinas oficiais de distintas institucións. A busca centrouse en datos socioeconómicos e de desenvolvemento da provincia de Ourense, e analizáronse diferentes intervalos de recollida (mensual, trimestral, anual, bienal, etc.).

En moitas das fontes consultadas, a dispoñibilidade de datos era escasa por varios motivos: i) non abarcaban unha serie temporal longa dabondo para poder realizar modelos de aproximación mediante aprendizaxe automática; ii) presentábanse gran cantidade de datos baleiros; ou iii) en moitas ocasións, as series temporais das distintas variables tiñan diferentes intervalos de recollida, o que non permitía o seu uso.

A primeira fonte de busca de datos analizada foron as proporcionadas polo Instituto Nacional de Estatística (INE) [36]. A través do sitio web oficial localizáronse as seguintes series temporais:

1. Índice de prezos ao consumidor/a. Índices provinciais (Ourense): xeral e de grupos ECOICOP (índice xeral). Base 2021. Mensual, 2002-2023.
2. Persoas activas por grupos de idade (total) e provincia (Ourense) en miles de persoas. Trimestral, 2002-2023.
3. Persoas inactivas por situación de inactividade (total) e provincia (Ourense) en miles de persoas. Trimestral, 2002-2023.
4. Persoas ocupadas por sector económico (total) e provincia (Ourense) en miles de persoas. Trimestral, 2002-2023.
5. PIB pm oferta (prezos de mercado, prezos correntes), en millóns de euros. Datos non axustados para a estacionalidade e o calendario, e datos axustados para estacionalidade e calendario. Produto interior bruto a prezos de mercado (España). Trimestral, 1995-2023.

A segunda fonte foi a proporcionada polo Instituto Galego de Estatística (IGE) [37]. A través do sitio web oficial localizáronse as seguintes series temporais:

1. Postos de traballo (Galicia). Trimestral, 1995-2023.
2. PIB pm (Galicia). Trimestral, 1995-2023.

4.2 Datos de calidade do aire

A recollida de datos de calidade do aire realizouse mediante a compilación das series históricas dispoñibles nos históricos de calidade do aire de Meteogalicia [38]. A través do servidor de descargas do sitio web oficial de Meteogalicia (Servizo Meteorolóxico de Galicia, Dirección Xeral de Calidade Ambiental, Sostibilidade e Cambio Climático, Vicepresidencia Segunda e Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Vivenda [39]) localizáronse varias estacións de calidade do aire. Finalmente elixiuse a estación de Ourense-Gómez Franqueira como a estación de referencia para toda a provincia, xa que as outras dúas estacións existentes, Laza e Xinzo de Limia, presentaban unha gran cantidade de datos que faltaban e podían representar un inconveniente á hora de levar a cabo os modelos. Elixíronse as seguintes series temporais de variables de calidade do aire:

1. CO (mg/m³). Diario, 2008-2023.
2. NO (µg/m³). Diario, 2005-2023.
3. NO₂ (µg/m³). Diario, 2005-2023.
4. NO_x (µg/m³). Diario, 2005-2023.
5. O₃ (µg/m³). Diario, 2005-2023.
6. PM₁₀ (µg/m³). Diario, 2007-2023.
7. PM_{2,5} (µg/m³). Diario, 2015-2023.
8. SO₂ (µg/m³). Diario, 2005-2023.

4.3 Bases de datos e estatísticos utilizados

Unha vez analizados todos os datos dispoñibles, montouse a base de datos para desenvolver os diferentes modelos de aprendizaxe automática, para o que é necesario converter todos os datos nun intervalo trimestral. Xa coa matriz global de datos, elimínanse todos os casos nos que se atopan datos erróneos ou baleiros. É necesario indicar que os datos das persoas ocupadas por sector económico (total) e provincia (Ourense), e PM_{2,5} foron eliminados porque a súa recollida comeza no primeiro trimestre de 2008 e o cuarto trimestre do 2015, respectivamente.

A base de datos desenvolvida dividiuse en tres grupos diferentes: i) un primeiro grupo (grupo de adestramento), con aproximadamente o 60 % dos datos totais, destinado a adestrar os diferentes modelos de aprendizaxe automática; ii) un segundo grupo (grupo de validación), con aproximadamente o 30 % dos datos totais, destinado a seleccionar

os hiperparámetros máis axeitados para os diferentes modelos desenvolvidos; e iii) un terceiro grupo (grupo de proba) constituído aproximadamente por un 10 % dos datos dispoñibles, que ten como finalidade verificar o bo funcionamento do modelo seleccionado para o seu posterior uso nunha situación real [40].

Para realizar a predición dos diferentes contaminantes da atmosfera levaranse a cabo dúas aproximacións diferentes:

1. Un primeiro enfoque no que se empregarán como variables de entrada todos os indicadores socioeconómicos dispoñibles, sexan españois, galegos ou ourensáns; é dicir, i) o índice de prezos ao consumidor/a (Ourense); ii) as persoas activas (Ourense); iii) as persoas inactivas (Ourense); iv-v) o PIB pm non axustados e axustados (España); vi) os postos de traballo (Galicia); e vii) o PIB pm (Galicia).
2. Un segundo enfoque no que só se teñen en conta os indicadores obtidos dos datos galegos e ourensáns.

O bo rendemento dos modelos seleccionados determinouse en función de diferentes parámetros estatísticos moi utilizados como o erro cadrado medio (RMSE), o erro relativo (RE) e o coeficiente de correlación (r). Elíxese como o mellor modelo o que teña o RMSE máis baixo para a fase de validación.

4.4 Programas utilizados

Para desenvolver os modelos utilizáronse dous ordenadores: i) un AMD Ryzen 9 7950X 16-Core con 128 GB de RAM e sistema operativo Windows 11 Pro, e ii) un Intel Core i7-8700 con 64 GB de RAM e un sistema operativo Windows 10 Pro. Os diferentes modelos desenvolvéronse mediante o software RapidMiner Studio Educational e Trial 9.10.001 e 10.2.000 (RapidMiner GmbH). As diferentes figuras foron realizadas con SigmaPlot 13.0. (Systat Software).

4.5 Estudo de hiperparámetros

O primeiro paso para desenvolver os diferentes modelos de aprendizaxe consistiu en afinar os seus parámetros característicos.

Para os modelos do bosque aleatorio hai unha serie de hiperparámetros característicos que se poden estudar [41-43] para desenvolver un modelo que sexa capaz de predicir correctamente [40]. Para esta aproximación estudáronse os seguintes

hiperparámetros: i) número de árbores (entre 1 e 200 con 199 pasos en escala lineal); ii) profundidade (entre 1 e 200 con 199 pasos en escala lineal); e iii) prepoda (verdadeiro ou falso). Os modelos alimentáronse cos datos en escala real ou someténdoo a un proceso de normalización (no grupo de adestramento e logo aplicándoo ao resto das fases) comprendida no rango $[-1,1]$ ou mediante unha transformada Z.

Por outro lado, os modelos baseados en SVM tamén se caracterizan por dispoñer dunha ampla combinación de hiperparámetros. Neste caso estudáronse os seguintes hiperparámetros: i) tipo de SVM (ϵ -SVR ou ν -SVR); ii) γ (variando no rango, aproximadamente, $[2^{-20}, 2^8]$ e usando 28 pasos en escala lineal ou en escala logarítmica); e iii) C (variando no rango $[2^{-10}, 2^{20}]$ e usando 28 pasos en escala lineal ou en escala logarítmica).

Finalmente, no que se refire ao desenvolvemento de modelos baseados en redes neuronais artificiais, os hiperparámetros máis característicos que afectan á precisión das redes neuronais artificiais son a función de adestramento, a de transferencia, o número de neuronas, o número de capas, os ciclos de adestramento, etc. [44, 45]. A elección dos hiperparámetros, e concretamente a elección da súa inicialización, pode presentar variacións importantes segundo a fonte consultada. Neste caso desenvolvéronse redes neuronais artificiais cunha única capa intermedia que estaría formada por i) un número de neuronas entre 1 e $2n + 1$ (n é o número de variables na capa de entrada); ii) adestrada cuns ciclos de adestramento comprendidos entre 1 e 524 288 (usando 28 pasos lineais ou logarítmicos); e iii) con decaemento (verdadeiro ou falso).

5 Resultados

5.1 Enfoque 1

Para levar a cabo o primeiro enfoque, empregouse unha matriz que ten como variables de entrada: i) o índice de prezos ao consumidor/a (Ourense); ii) as persoas activas (Ourense); iii) as persoas inactivas (Ourense); iv-v) o PIB pm non axustados e axustados (España); vi) os postos de traballo (Galicia); e vii) o PIB pm (Galicia). Estas variables utilizaráanse para predicir os niveis de calidade do aire das diferentes variables dispoñibles: i) CO; ii) NO; iii) NO₂; iv) NO_x; v) O₃; vi) PM₁₀ e vii) SO₂.

De entre todos os modelos desenvolvidos (arredor de 250 000 modelos de bosque aleatorio, máquina de vectores soporte e rede neuronal artificial), e como se indicou anteriormente no apartado 4.3, escóllense os modelos que presenten o menor RMSE para a fase de validación de cada unha das aproximacións. Deste xeito, todos os modelos desenvolvidos redúcense a un total de tres modelos e dentro destes tres, baseándose de novo no RMSE máis baixo, escóllese o mellor modelo para cada unha das variables de contaminación atmosférica.

Como era de esperar, os diferentes modelos seleccionados para predicir cada unha das variables de contaminación atmosférica presentan valores RMSE moi diferentes. O erro relativo utilizouse, na fase conxunta de adestramento e validación, e na fase de proba, como medición de axuste para intuír o bo funcionamento de cada un destes modelos. Neste primeiro enfoque, os erros relativos varían entre o 6,2 % para o modelo destinado a predicir PM₁₀ e o 48,1 % para o modelo destinado a predicir a concentración de NO. Na fase de proba os erros aumentan, oscilando entre o 28,5 % para a predición do CO e o 90,7 % para a predición de SO₂, e están as predicións de O₃, PM₁₀ e NO_x entre 29,2 % e o 34,4 %.

Na figura 3 pódense ver os mellores modelos seleccionados para cada unha das variables de contaminación atmosférica analizadas mediante o enfoque 1.

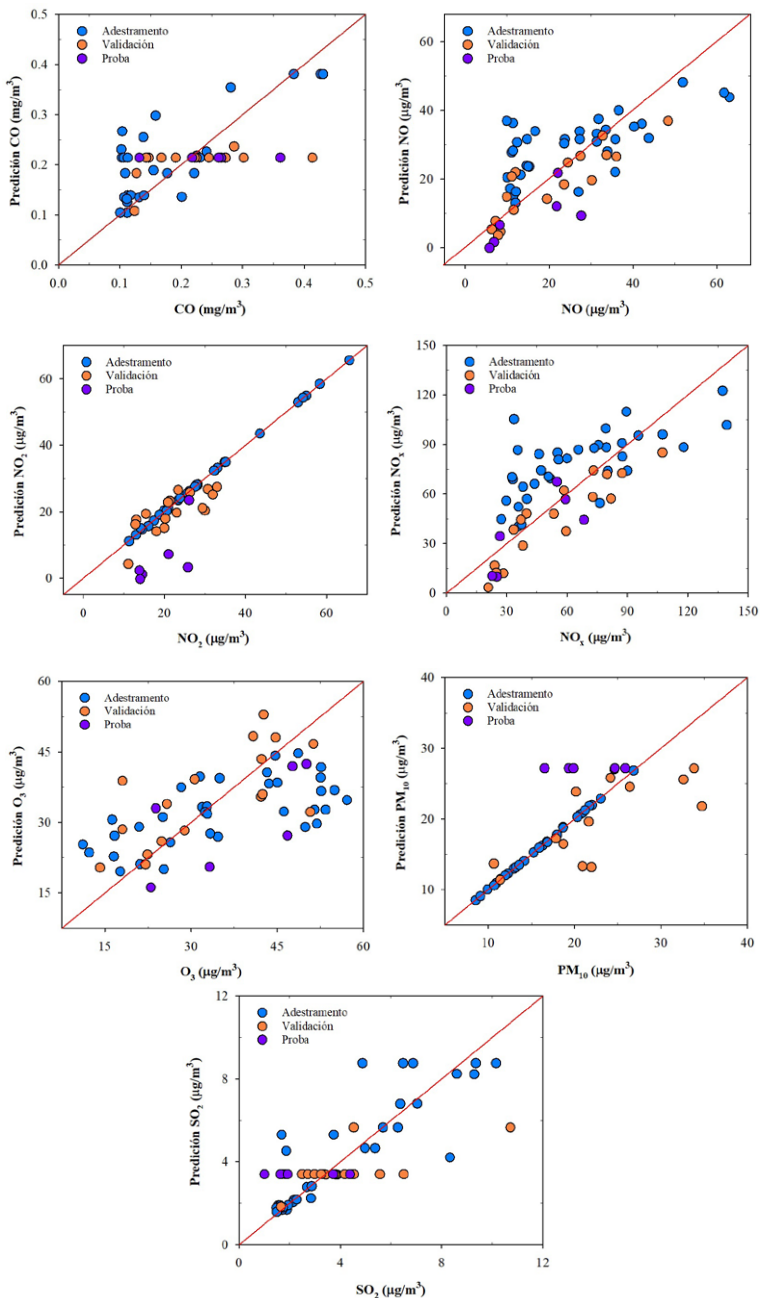


Figura 3. Valores reais e preditos para cada unha das variables de calidade do aire analizadas utilizando o enfoque 1, que inclúe indicadores españois, galegos e ourensáns. Os puntos azuis (●) correspóndense cos datos de adestramento; os laranxas (●), cos datos de validación; e os morados (●), cos datos de proba. A liña vermella corresponde á liña de pendente 1.

En todas as gráficas pódese observar unha gran dispersión dos datos arredor da liña de pendente 1. O NO_2 presenta un bo comportamento para a fase de adestramento e validación; non obstante, pódese ver como na fase de proba existe unha gran dispersión.

Á vista dos resultados, pódese afirmar que os axustes obtidos por estes modelos de aprendizaxe automática, e que empregan variables socioeconómicas españolas, galegas e ourensáns, son moi diferentes entre si. Ademais, non parecen ter un poder de predición adecuado, polo que non se poden relacionar de forma correcta os indicadores socioeconómicos utilizados e a calidade do aire.

5.2 Enfoque 2

Estes novos modelos empregan unicamente cinco variables galegas e ourensáns (fronte ás sete dos modelos do enfoque 1). Empregarase unha matriz que consta destas variables de entrada: i) o índice de prezos ao consumidor/a (Ourense); ii) as persoas activas (Ourense); iii) as persoas inactivas (Ourense); iv) os postos de traballo (Galicia); v) o PIB pm (Galicia). Estas variables utilizaranse para predicir os niveis de calidade do aire das mesmas variables usadas no enfoque 1.

Como era de esperar, os modelos presentan resultados de menor calidade ca os presentados anteriormente no apartado 5.1. Neste caso presentan, para a fase conxunta de adestramento e validación, uns erros relativos entre o 13,7 % (SO_2) e o 44,6 % (NO). Do mesmo xeito que ocorreu cos modelos do enfoque 1, estes valores de erro relativo aumentan significativamente para a fase de proba, que oscilan entre o 27,7 % para a variable NO_2 e o 144 % para a concentración de SO_2 . Tres das cinco variables de calidade do aire restantes teñen valores de erro relativo entre o 29,8 % (PM_{10}) e o 31,3 % (CO).

Na figura 4 pódese ver a representación gráfica dos valores preditos fronte aos reais utilizando os diferentes modelos escollidos segundo o enfoque 2. Como se pode ver, parece que a dispersión dos puntos arredor da liña de pendente 1 aumenta nalgúns casos, coma no estudo da PM_{10} o do O_3 , mentres que se observa unha pequena mellora nas fases de adestramento e validación do modelo SO_2 . Conclúese que o uso exclusivo de variables galegas e ourensáns provoca unha perda de axuste nos modelos escollidos.

En función dos resultados, pódese afirmar que as variables de entrada galegas e ourensáns deberían complementarse con outras variables (de dentro ou de fóra da comunidade autónoma), debido a que os axustes proporcionados polos modelos elixidos non permiten relacionar de forma correcta os indicadores socioeconómicos utilizados e a calidade do aire.

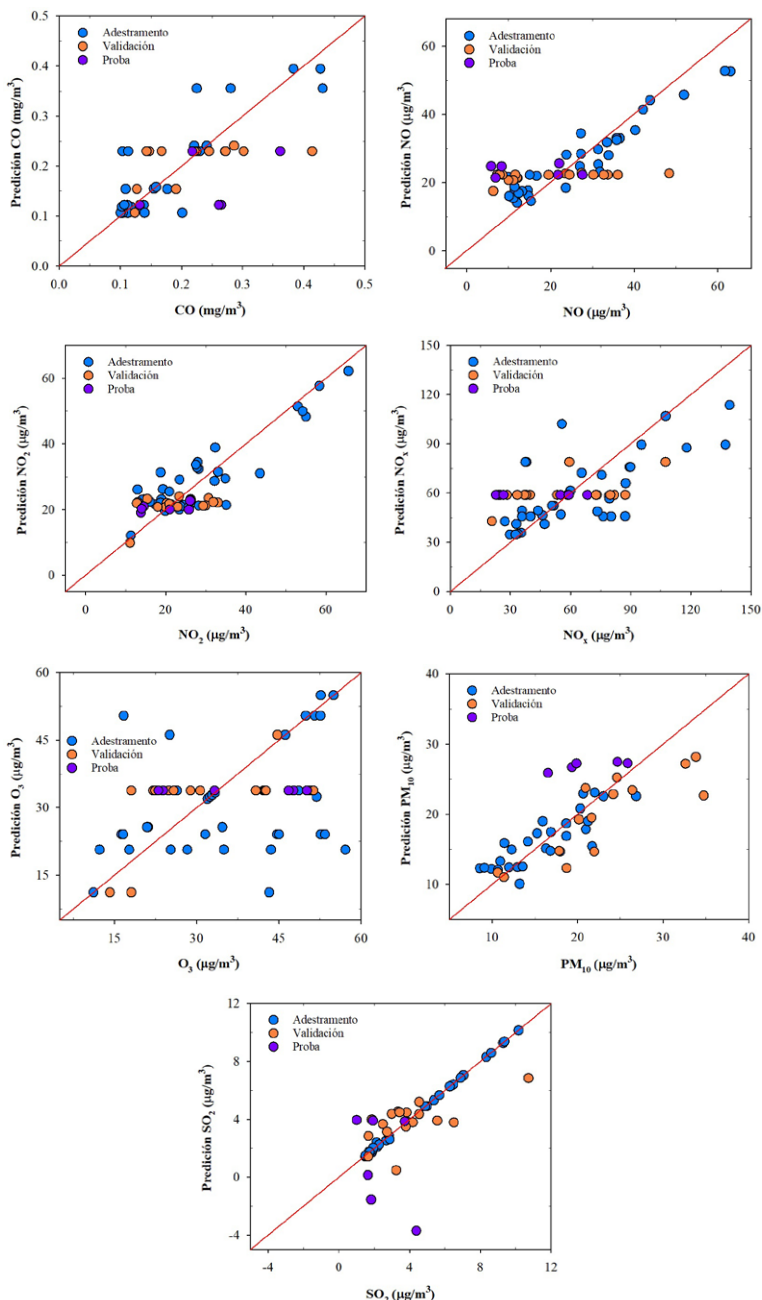


Figura 4. Valores reais e preditos para cada unha das variables de calidade do aire analizadas utilizando o enfoque 2, que inclúe indicadores galegos e ourensáns. Os puntos azuis (●) correspóndense cos datos de adestramento; os laranxas (●), cos datos de validación; e os morados (●), cos datos de proba. A liña vermella corresponde á liña de pendente 1.

5.3 Enfoque 3

Como consecuencia dos malos resultados obtidos polos enfoques 1 e 2, intentouse unha mellora destes modelos incorporando dúas novas variables de entrada que teñan en conta o nivel de poboación de Galicia e o da provincia de Ourense. A inclusión destas variables na base de datos permitiu o cálculo dos niveis de contaminantes na súa forma per cápita. Esta transformación podería contribuír a reducir o ruído entre as variables de entrada e saída, e conseguir un maior poder de predición para os modelos desenvolvidos. Os datos destas novas variables obtivéronse da páxina do Instituto Galego de Estatística (Series históricas de poboación. Poboación para Galicia, provincias, comarcas e concellos. Anual, 1981-2022) [37].

Polo tanto, incluíronse dúas novas variables (poboación de Galicia e poboación de Ourense) como variables de entrada nos novos modelos, que xunto coas sete variables orixinais utilizadas no enfoque 1 fan un total de 9 variables de entrada. As variables de saída correspondentes aos distintos niveis de contaminación calculáronse por habitante, dividindo os valores reais polo número de habitantes, neste caso anual (por non dispor de datos trimestrais), da provincia de Ourense.

Novamente, escóllense os mellores modelos de cada un dos tipos de aproximación de aprendizaxe automática a partir do valor máis baixo de RMSE na etapa de validación. Entre as aproximacións escollidas, elíxese de novo a que teña o valor RMSE máis baixo e dá como resultado sete modelos destinados a predicir, cada un, unha variable de calidade do aire.

Como era de esperar, os valores RMSE destes novos modelos son moito máis baixos ca os modelos de enfoque 1, basicamente debido á natureza dos datos (valores reais fronte aos valores per cápita). Usando de novo o erro relativo como medición de axuste de referencia, pódese observar que estes erros adoitan ser maiores na maioría dos casos ca os cometidos polos modelos de enfoque 1. Isto parece indicar que a transformación dos valores reais de contaminación a valores per cápita ten un impacto negativo na capacidade de predición dos modelos. Así, na fase conxunta de adestramento e validación, o valor máximo de erro relativo alcanza o 51,4% (NO_x) cando, anteriormente, nos modelos desenvolvidos con enfoque 1, o erro relativo máximo correspondía a un 48,1% (NO). Para a fase de consulta obsérvase unha diminución do erro máximo cometido polos modelos pero, de maneira xeral, catro modelos ofrecen peores predicións ca os restantes tres modelos.

Finalmente, a figura 5 mostra os gráficos de valores preditos fronte a reais para cada un dos modelos seleccionados, empregando como variable de contaminación atmosférica a versión de concentración per cápita.

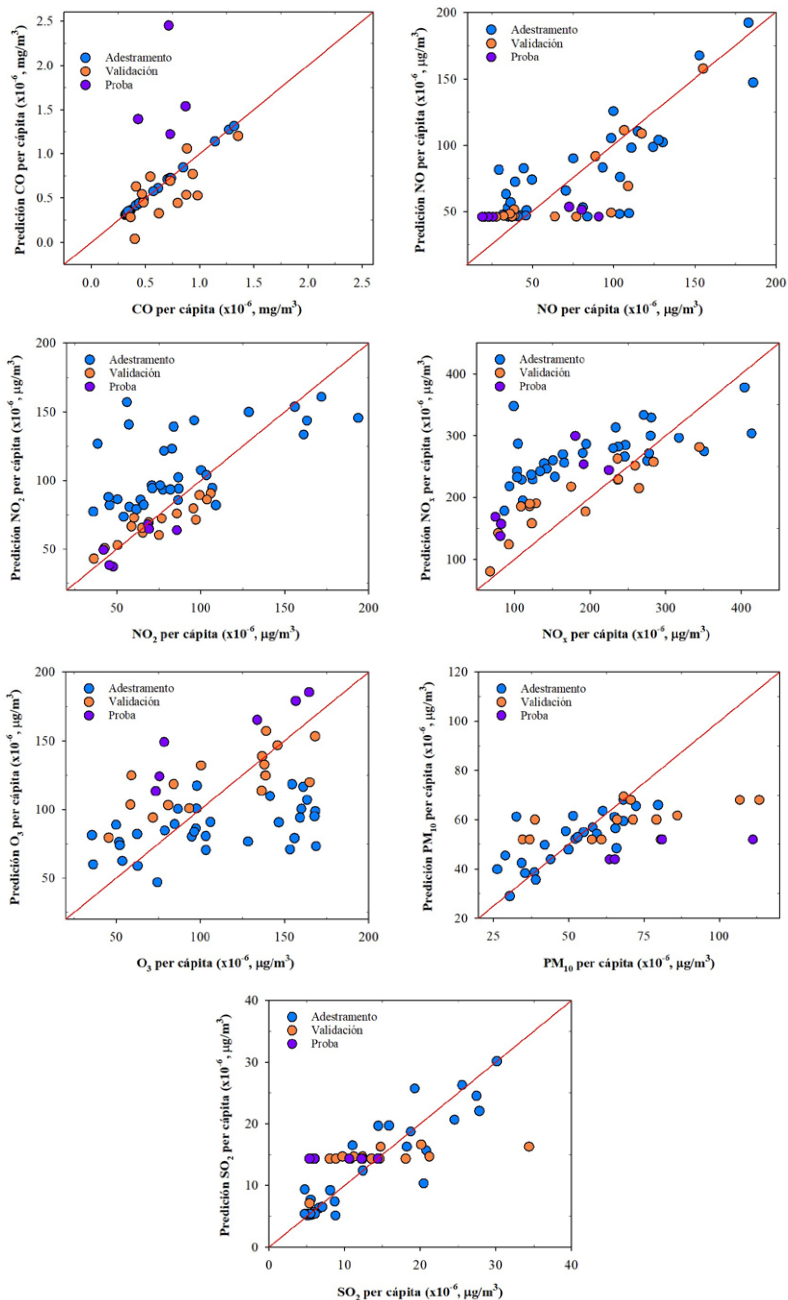


Figura 5. Valores reais e preditos para cada unha das variables de calidade do aire (per cápita) analizadas utilizando o enfoque 3, que inclúe indicadores españois, galegos e ourensáns. Os puntos azuis (●) correspóndense cos datos de adestramento; os laranxas (●), cos datos de validación; e os morados (●), cos datos de proba. A liña vermella corresponde á liña de pendente 1.

Comparando as gráficas da figura 5 coas da figura 3, pódese observar que, a pesar da inclusión de dúas novas variables de entrada, e da adaptación da variable de saída, os modelos non son capaces de mellorar, en xeral, os desenvolvidos no enfoque 1.

Con isto conclúese que os modelos desenvolvidos con nove variables de entrada que inclúen os indicadores socioeconómicos españois, galegos e ourensáns, e como variables de saída as concentracións per cápita, non melloran os modelos anteriores (enfoque 1 e enfoque 2).

6 Conclusións

Á vista do desenvolvemento da investigación realizada neste capítulo do libro e tendo en conta os resultados obtidos, pódese concluír que:

A tarefa de obter datos das distintas fontes seleccionadas resultou complicada: i) pola pouca cantidade e variedade de datos de calidade do aire dentro da provincia de Ourense; ii) pola complicación de poder obter datos con escalas de tempo compatibles (mensuais, trimestrais, anuais etc.); e, finalmente, iii) pola curta serie temporal de recollida de datos existente na actualidade.

A pesar da gran cantidade de modelos desenvolvidos para calquera dos tres enfoques propostos, os resultados obtidos non presentan unha boa correlación entre as variables de calidade do aire e os datos socioeconómicos empregados.

Actualmente, continúaase traballando na mellora dos modelos buscando series temporais máis longas, incluíndo novas variables, transformando outras e estudando diferentes combinacións de hiperparámetros para os modelos de aprendizaxe automática desenvolvidos.

7 Agradecementos

Capítulo do proxecto INOU23-01 da convocatoria de Axudas a grupos de investigación do campus de Ourense 2023 da Universidade de Vigo, financiado pola Deputación Provincial de Ourense. Os autores e autoras queren agradecer a RapidMiner GmbH as licenzas, educativa e gratuíta, do software RapidMiner Studio nas súas versións 9.10.001 e 10.2.000. Grazas a Raquel Rodríguez-Fernández polo seu apoio durante a realización dos modelos.

8 Aclaracións

Parte da información contida neste capítulo do libro foi extraída da solicitude e da memoria final do proxecto de investigación INOU-Campus Auga 2023 «Crecemento económico e contaminación, unha aproximación dende a aprendizaxe automática».

9 Referencias

- [1] Capó Parrilla, J. Curva de Kuznets Ambiental: Evidencia Para Europa Disponible en liña: https://dea.uib.es/digitalAssets/128/128288_4.pdf. 07/03/2024.
- [2] Correa Restrepo, F., Vasco Ramírez, A. F., Pérez Montoya, C. (2005) La Curva Medioambiental de Kuznets: Evidencia Empírica Para Colombia Grupo de Economía Ambiental (GEA). Semestre Económico, Universidad de Medellín, Colombia 8, 13–30.
- [3] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens III, W. W. The Limits to Growth; (1972): Potomac Associates Book.
- [4] Kuznets, S. (1955) Economic Growth and Income Inequality. The American Economic Review 45, 1–28.
- [5] Leal, P. H., Marques, A. C. (2022) The Evolution of the Environmental Kuznets Curve Hypothesis Assessment: A Literature Review under a Critical Analysis Perspective. Heliyon 8, e11521.
- [6] Falconí, F., Burbano, R., Cango, P. (2016) La Discutible Curva de Kuznets. Flacso Andes 1–19.
- [7] Yandle, B., Vijayaraghavan, M., Bhattarai, M. (2002) The Environmental Kuznets Curve A Primer. PERC Research Study 02-1.
- [8] Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., Wheeler, D. (2002) Confronting the Environmental Kuznets Curve. Journal of Economic Perspectives 16, 147–168.
- [9] Grossman, G. M., Krueger, A. B. (1991) Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. NBER Working Paper Series 3914.
- [10] Zilio, M., Caraballo, M. Á. (2014) ¿El Final de La Curva de Kuznets de Carbono? Un Análisis Semiparamétrico Para La América Latina y El Caribe. El Trimestre Económico 81, 241–270.
- [11] Roca, J., Padilla, E., Farré, M., Galletto, V. (2001) Economic Growth and Atmospheric Pollution in Spain: Discussing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis. Ecological Economics 39, 85–99.
- [12] Iglesias, J., Carmona, M., Golpe, A. A., Martín, J. M. (2013) La Curva de Kuznets y La Emisión de CO₂ En España, 1850-2008. Economía Industrial 389, 135–144.

- [13] Madaleno, M., Moutinho, V. (2021) Analysis of the New Kuznets Relationship: Considering Emissions of Carbon, Methanol, and Nitrous Oxide Greenhouse Gases-Evidence from EU Countries. *International Journal of Environmental Research And Public Health* 18, 2907.
- [14] Flores-Xolocotzi, R., Ceballos Pérez, S. G. (2022) Prueba de Hipótesis de La Curva Ambiental de Kuznets Para Residuos Sólidos Urbanos en Municipios del Estado de México e Hidalgo 2010-2018. *Acta Universitaria* 32, 1–18.
- [15] Aydin, M., Degirmenci, T., Gurdal, T., Yavuz, H. (2023) The Role of Green Innovation in Achieving Environmental Sustainability in European Union Countries: Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis. *Gondwana Research* 118, 105–116.
- [16] Bao, Z., Lu, W. (2023) Applicability of the Environmental Kuznets Curve to Construction Waste Management: A Panel Analysis of 27 European Economies. *Resources, Conservation and Recycling* 188, 106667.
- [17] Pablo-Romero, M. del P., Pozo-Barajas, R., Molleda-Jimena, G. (2021) Residential Energy Environmental Kuznets Curve Extended with Non-Linear Temperature Effects: A Quantile Regression for Andalusian (Spain) Municipalities. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 48984–48999.
- [18] Sesma-Martín, D., Puente-Ajovín, M. (2022) The Environmental Kuznets Curve at the Thermoelectricity-Water Nexus: Empirical Evidence from Spain. *Water Resources and Economics* 39, 100202.
- [19] Stern, D. I. (2004) The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development* 32, 1419–1439.
- [20] Stern, D. I. (2017) The Environmental Kuznets Curve after 25 Years. *Journal of Bioeconomics* 19, 7–28.
- [21] Díaz Vázquez, M. R. (2007) Estudio Empírico de las Causas Subyacentes en la Hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental: Influencia de Factores Exógenos y Análisis de Descomposición, Tesis Doutoral. Universidade de Santiago de Compostela.
- [22] Mukhamediev, R. I., Popova, Y., Kuchin, Y., Zaitseva, E., Kalimoldayev, A., Symagulov, A., Levashenko, V., Abdoldina, F., Gopejenko, V., Yakunin, K., et al. (2022) Review of Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies: Classification, Restrictions, Opportunities and Challenges. *Mathematics* 10, 1–25.
- [23] Singh, A., Thakur, N., Sharma, A. (2016) A Review of Supervised Machine Learning Algorithms. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*; pp. 1310–1315.
- [24] Iranzad, R., Liu, X. (2024) A Review of Random Forest-Based Feature Selection Methods for Data Science Education and Applications. *International Journal of Data Science and Analytics*.

- [25] Siqueira, R. G., Moquedace, C. M., Fernandes-Filho, E. I., Schaefer, C. E. G. R., Francelino, M. R., Sacramento, I. F., Michel, R. F. M. (2024) Modelling and Prediction of Major Soil Chemical Properties with Random Forest: Machine Learning as Tool to Understand Soil-Environment Relationships in Antarctica. *CATENA* 235, 107677.
- [26] Kapsiani, S., Howlin, B. J. (2021) Random Forest Classification for Predicting Lifespan-Extending Chemical Compounds. *Scientific Reports* 11, 13812.
- [27] Awad, M., Khanna, R. (2015) Support Vector Machines for Classification BT - Efficient Learning Machines: Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers. In *Efficient Learning Machines Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers*; Awad, M., Khanna, R., Eds.; Apress: Berkeley, CA, pp. 39–66.
- [28] Boser, B. E., Guyon, I. M., Vapnik, V. N. (1992) A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers. In *Proceedings of the Proceedings of the Fifth Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory*; 144–152.
- [29] Valero-Carreras, D., Aparicio, J., Guerrero, N. M. (2021) Support Vector Frontiers: A New Approach for Estimating Production Functions through Support Vector Machines. *Omega* 104, 102490.
- [30] Duan, J., Tian, X., Ma, W., Qiu, X., Wang, P., An, L. (2019) Electricity Consumption Forecasting Using Support Vector Regression with the Mixture Maximum Correntropy Criterion. *Entropy* 21, 707.
- [31] Anjos, O., Iglesias, C., Peres, F., Martínez, J., García, Á., Taboada, J. (2015) Neural Networks Applied to Discriminate Botanical Origin of Honeys. *Food Chemistry* 175, 128–136.
- [32] Ning, Z., Zhao, X., Fan, L., Peng, Z., Ma, F., Jin, Z., Deng, J., Duan, J., Hou, B. (2024) Application of Artificial Neural Networks throughout the Entire Life Cycle of Coatings: A Comprehensive Review. *Progress in Organic Coatings* 189, 108279.
- [33] Huang, X., You, Y., Zeng, X., Liu, Q., Dong, H., Qian, M., Xiao, S., Yu, L., Hu, X. (2024) Back Propagation Artificial Neural Network (BP-ANN) for Prediction of the Quality of Gamma-Irradiated Smoked Bacon. *Food Chemistry* 437, 137806.
- [34] Nabawy, M., Mohamed, A. G. (2024) Risks Assessment in the Construction of Infrastructure Projects Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Construction Management* 24, 361–373.
- [35] Alam, M. S., Deb, J. B., Amin, A. Al, Chowdhury, S. (2024) An Artificial Neural Network for Predicting Air Traffic Demand Based on Socio-Economic Parameters. *Decision Analytics Journal* 10, 100382.
- [36] Instituto Nacional de Estadística Instituto Nacional de Estadística Disponible en liña: <https://www.ine.es/index.htm> (Consultado o 21 xuño 2023).

- [37] Instituto Galego de Estatística. Disponible en liña: <https://www.ige.gal> (Consultado o 23 xuño 2023).
- [38] MeteoGalicia Consulta de Datos de Calidade do Aire Disponible en liña: <https://www.meteogalicia.gal/web/ica/datos/> (Consultado o 21 xuño 2023).
- [39] MeteoGalicia Política de Calidade Disponible en liña: <https://www.meteogalicia.gal/web/politica-de-calidade> (Consultado o 7 decembro de 2023).
- [40] Simal-Gandara, J., Astray, G. (2022) Detección de Fraude en Pan y Harina de Trigo Autóctono Mediante Imágenes Hiperespectrales Acoplada a Métodos de Aprendizaje Automático (SmartWheat). *Proyectos de Generación de Conocimiento*.
- [41] Zhu, N., Zhu, C., Zhou, L., Zhu, Y., Zhang, X. (2022) Optimization of the Random Forest Hyperparameters for Power Industrial Control Systems Intrusion Detection Using an Improved Grid Search Algorithm. *Applied Sciences* 12, 10456.
- [42] Probst, P., Wright, M. N., Boulesteix, A.-L. (2019) Hyperparameters and Tuning Strategies for Random Forest. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 9, e1301.
- [43] Kulkarni, V. Y., Sinha, P. K. (2012) Pruning of Random Forest Classifiers: A Survey and Future Directions. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Data Science & Engineering (ICDSE)*; pp. 64–68.
- [44] Hovden, I. T. (2019) *Optimizing Artificial Neural Network Hyperparameters and Architecture*. University of Oslo. Disponible en liña: https://www.mn.uio.no/fysikk/english/people/aca/ivarth/works/in9400_nn_hpo_nas_hovden_r2.pdf
- [45] Jin, M., Liao, Q., Patil, S., Abdulraheem, A., Al-Shehri, D., Glatz, G. (2022) Hyperparameter Tuning of Artificial Neural Networks for Well Production Estimation Considering the Uncertainty in Initialized Parameters. *ACS Omega* 7, 24145–24156.

Estratexias para a xestión sostible de residuos vitivinícolas na provincia de Ourense

F. J. Sánchez-Sellero,¹ A. Alvaredo-López-Vizcaíno,² S. Rivas,² M. Fernández,³
V. M. Suárez-Porto,¹ J. A. Teixeira,⁴ M. M. Cruz-González,¹
G. Garrote,² e P. Ferreira-Santos^{2*}

¹*Departamento de Organización de Empresas e Mercadotecnia.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo
javiss@uvigo.gal, mcruz@uvigo.gal, vsuarez@uvigo.gal*

²*Departamento de Enxeñaría Química. Campus de Ourense. Universidade de Vigo
pedromiguel.ferreira@uvigo.gal*, sandrarivas@uvigo.gal, adela.alvaredo@uvigo.gal*

³*Departamento de Bioloxía Vexetal e Ciencias do Solo.
Campus de Ourense. Universidade de Vigo
mfgonzalez@uvigo.gal*

⁴*Centro de Enxenharia Biolóxica. Campus de Gualtar. Universidade do Minho
jateixeira@deb.uminho.pt*

Resumo

Nos últimos anos está a aumentar a demanda de produtos biofuncionais a partir de recursos naturais, especialmente derivados de subprodutos agroforestais grazas á súa sustentabilidade e renovabilidade. Neste sentido, persoal investigador e industrias incidiron na procura de novas materias primas ricas en compostos bioactivos de interese para a industria alimentaria, farmacéutica e cosmética. Este traballo trata unha estratexia de valorización integral de diferentes residuos da industria vitivinícola (bagazo e poda de vide) para obter produtos de alto valor como compostos antioxidantes, prebióticos e bioetanol. Ademais, elaborouse unha análise socioeconómica para comprender a viabilidade do estudo na provincia de Ourense. En resumo, as tecnoloxías de explosión de vapor e de quecemento óhmico postúlanse

como métodos eficientes e respectuosos co medio ambiente para procesar biomasa lignocelulósica e son ferramentas útiles para recuperar compostos biofuncionais a través do enfoque da biorrefinaría. A partir destas tecnoloxías pódense obter extractos bioactivos da poda de vide e do bagazo da uva, que se empregan na formulación de alimentos (como conservantes, antioxidantes ou ingredientes bioactivos) e no sector nutracéutico. Ademais, as podas de vide pretratadas con explosión de vapor poden ser aproveitadas e valorizadas en diversos sectores industriais como, por exemplo, para a produción de biocombustibles.

Desde o punto de vista socioeconómico, a través dunha estratexia apoiada na economía circular, o desenvolvemento de produtos de alto valor procedentes dos residuos agrícolas pode ser unha oportunidade para o desenvolvemento sostible das zonas rurais. Mediante a reutilización de subprodutos, a redución dos custos dos insumos e a reciclaxe dos residuos xerados durante o seu procesamento, increméntase a oportunidade de implantar elementos de sustentabilidade e resiliencia nos sistemas produtivos das agroindustrias, así como a creación de emprego e a mellora da xestión dos residuos agrícolas e industriais.

Palabras clave: valorización de residuos vitivinícolas, produtos de alto valor engadido, impacto socioeconómico

Introdución

No escenario actual de recursos limitados, millóns de toneladas de refugallos e de subprodutos alimentarios son descartados mundialmente pola industria agroalimentaria. Este feito representa un problema medioambiental que provoca danos económicos e materiais, cuxa xestión lle custa á UE 143 000 millóns de euros por ano [1].

O sector vitivinícola é unha das actividades agrícolas máis importantes no mundo. Só en 2022, a produción mundial de uva foi de 73,5 millóns de toneladas [2]. A produción de uva en Europa representa o 36 % da produción mundial total, e os principais produtores europeos son Italia, Francia e España (táboa 1) [2]. Segundo a Organización Internacional da Viña e do Viño, en 2022 a produción mundial de viño estímase en 258×10^8 L [2]. España foi o terceiro país do mundo que máis viño exportou en 2020, o que supuxo o 70 % da produción nacional, con ganancias de máis de 2676 millóns de euros. Os principais viños exportados pertencen a denominacións de orixe protexida (DOP), o 17 % son viños a granel e o 15 % son espumosos [3].

Táboa 1. Principais países produtores de viño e produción entre 2018-2020 (millóns de hL/ano)

País	2018	2019	2020
Italia	54,8	47,5	49,1
Francia	49,2	42,2	46,6
España	44,9	33,7	40,7
EUA	26,1	25,6	22,8
Arxentina	14,5	13,0	10,8
Australia	12,7	12,0	10,6
Suráfrica	9,5	9,7	10,4
Chile	12,9	11,9	10,3
Alemaña	10,3	8,2	8,4
China	9,3	6,5	6,6

Na comunidade autónoma de Galicia, o sector vitivinícola consta de cinco DOP, catro indicacións xeográficas protexidas (IXP) e catro denominacións xeográficas (figura 1).

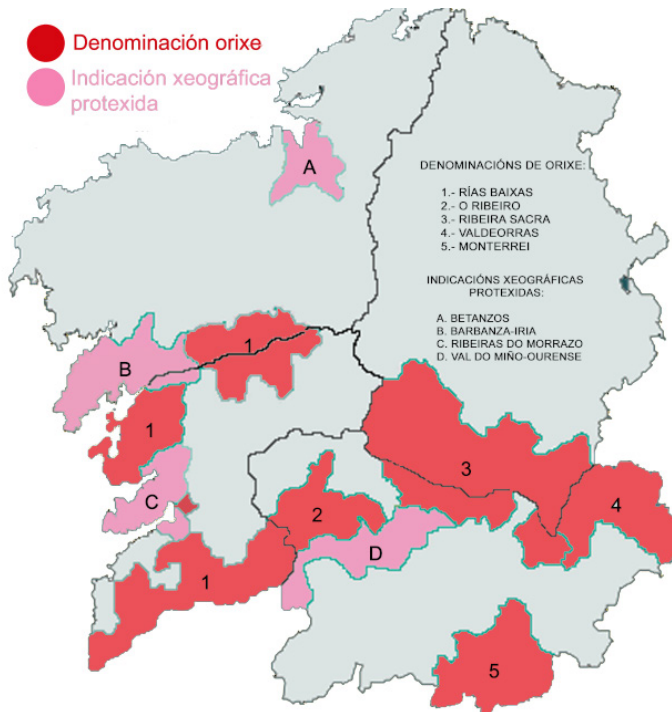


Figura 1. Localización das DOP e IXP de viños de Galicia
 Fonte: Museo do Viño de Galicia: «As denominacións de orixe»

A industria vitivinícola xera unha importante cantidade de residuos (aproximadamente o 30 %): os máis abundantes son o bagazo de uva (GP) e a poda de vide (VP). O GP representa ao redor do 20 % do total de uvas utilizadas para producir viño, prodúcese polo prensado das uvas e está formado por raspóns ou tallos, polpa residual, película e sementes. Tradicionalmente, o GP utilízase para producir augardentes ou como fertilizante. Tamén se emprega para obter produtos valiosos como enzimas, aceite de pebidas de uva, colorantes e ácido tartárico [4]. Dado que se trata dun subproduto moi abundante no proceso de elaboración do viño, é importante buscarlle un uso alternativo.

As VP son un residuo lignocelulósico que se xera anualmente como consecuencia da retirada de pólas vellas da vide co obxectivo de mellorar a súa produtividade na vindeira colleita. Cunha estimación de cinco toneladas por hectáreas e por ano [5], a VP é unha biomasa prometedora pola súa alta dispoñibilidade [6] e a súa composición, arredor dun 10 % de extractos ricos en compostos fenólicos, un 34 % de celulosa, un 19 % de hemicelulosas e un 27 % de lignina [5, 7, 8].

Neste contexto, o fraccionamento destes residuos para obter produtos de valor engadido require un tratamento adecuado para a recuperación eficiente dos compostos intracelulares e tamén a descomposición da estrutura lignocelulósica. O pretratamento seleccionado xoga un papel fundamental no éxito do proceso, xa que se considera o primeiro paso da biorrefinaría e, polo tanto, inflúe directamente nas fases posteriores de obtención de produtos de valor engadido.

Habitualmente, os sistemas convencionais de extracción de compostos valiosos a partir de residuos lignocelulósicos implican o uso de disolventes orgánicos e quecemento durante períodos prolongados de tempo, promovendo a degradación dos compostos de interese [9, 10], polo que é un proceso caro e altamente contaminante, moitas veces non axeitado para o propósito esperado. Tendo en conta os feitos expostos, é importante desenvolver e optimizar unha metodoloxía de extracción sostible e eficaz segundo os principios da Química Verde [9].

Na actualidade, estanse a desenvolver e a aplicar métodos máis rápidos e automatizados para extraer compostos bioactivos intracelulares, así como para descompoñer a estrutura lignocelulósica da biomasa para a posterior recuperación dos compoñentes estruturais (celulosa, lignina etc). Entre outras, a explosión de vapor

(SE), a tecnoloxía microondas, a extracción supercrítica e subcrítica, e as electrotecnoloxías (quecemento óhmico –OH–, campos eléctricos pulsados –PEF– etc) teñen como obxectivos aforrar enerxía e reducir o uso de disolventes orgánicos, para diminuír considerablemente o impacto ambiental e os custos xerais dos procesos [11]. Entre os diferentes métodos, a SE e o OH son os dous máis investigados actualmente [12, 13].

A SE é un tratamento hidrotermal no que a biomasa se quenta rapidamente introducindo vapor nun reactor a altas temperaturas (>160 °C) e presións (5-30 bar) durante un tempo de residencia definido (que vai desde segundos ata varios minutos), e xera unha rápida expansión de volume e de enerxía. O obxectivo principal da SE é abrir/romper a estrutura da biomasa lignocelulósica, para permitir un acceso máis sinxelo aos seus constituíntes (celulosa, hemicelulosa e lignina). Isto é importante porque estes constituíntes empréganse posteriormente en procesos de conversión bioquímica ou termoquímica para producir biocombustibles, produtos químicos ou materiais.

Na SE, o vapor penetra na estrutura da biomasa, o que fai que as fibras se inchen e se separen, facilitando a extracción dos constituíntes e aumentando a superficie dispoñible para as reaccións químicas posteriores [12].

Por outro lado, o OH é unha electrotecnoloxía que se centra no uso dunha corrente eléctrica que atravesa directamente a biomasa lignocelulósica e polo que se obtén un quecemento rápido e homoxéneo (efecto Joule). Ademais, o campo eléctrico induce á electroporación e á electropermeabilización da membrana celular da biomasa, polo que se aumenta a difusión intracelular de compostos no disolvente. Non obstante, o alcance da permeabilización depende de varias variables, como a intensidade da corrente eléctrica, o tempo de procesamento etc. [14]. Dende hai algún tempo, o OH utilízase en varias aplicacións industriais, como branqueo, evaporación, deshidratación e pasteurización. Recentemente, esta tecnoloxía aplicouse para extraer compostos biofuncionais [13,14]. O OH en comparación con outras electrotecnoloxías ten algunhas vantaxes, como a capacidade de controlar con precisión a taxa de quecemento e de carga térmica, o que leva a un aumento do rendemento da extracción, promove a extracción selectiva de compostos e diminúe o consumo enerxético. A combinación destas características conduce a un proceso cun menor custo e maior eficiencia.

Este traballo céntrase nunha estratexia de valorización integral de diferentes residuos da industria vitivinícola como o bagazo e a poda de vide. O obxectivo principal é obter produtos de alto valor como compostos antioxidantes, prebióticos e bioetanol. Ademais, fíxose un estudo socioeconómico para comprender a súa viabilidade na provincia de Ourense.

2 Materiais e métodos

2.1 Residuos vitivinícolas

Para realizar este traballo utilizouse:

- Poda de vide (VP), variedade treixadura, de cultivo ecolóxico, da Adegas L'Ombre, SCG, en Lentille (Ourense), recollida en marzo de 2023.

- Bagazo de uva tinta (GP), (DO Ribeiro) da Adegas Cuñas Davia, Cenlle (Ourense) de 2021.

As materias primas secáronse a 40 °C e moéronse ata un tamaño de partícula inferior a 3 mm. Finalmente, almacenáronse en bolsas de plástico na escuridade a 4 °C.

2.2 Caracterización dos residuos vitivinícolas

As análises químicas da composición dos residuos determináronse de acordo cos protocolos oficiais do Laboratorio Nacional de Enerxías Renovables (NREL) e incluíron extractos solubles en auga e en etanol (NREL/TP-510-42619), polisacáridos estruturais (en concreto celulosa e hemicelulosa), lignina klason e soluble en ácido (NREL/TP-510-42618) e contido de cinzas (NREL/TP-510-42622). O contido mineral determinouse mediante a espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado indutivamente (ICP-AES), despois da dixestión da biomasa con HNO₃. O contido de graxa determinouse segundo o método oficial AOAC (núm. 920.39). O contido total de proteínas estimado mediante o factor de conversión N × 6,25 realizouse cun destilador Kjeldahl (Kjeltec 8400 Analyzer, FOSS, Hilleroed, Dinamarca) mediante a cuantificación do nitróxeno despois da dixestión da biomasa con H₂SO₄. A humidade do PB determinouse gravimetricamente mediante un analizador de humidade (MAC 50/1/NH, RADWAG, Radom, Polonia). Os ácidos urónicos determináronse mediante o método de meta-hidroxidifenilo. Todos os experimentos se levaron a cabo por triplicado.

2.3 Condicións de extracción e preparación de extractos

2.3.1 Estudo de extracción de compostos fenólicos con explosión de vapor da poda de vide

Para a extracción con SE, introducíronse 200 g de VP no reactor de alta presión (240 x 150 x 90 mm, Demede Engineering and Research) conectado a un xerador de vapor de alta presión (250 °C), aplicando as condicións de temperatura de 170-210 °C e tempos entre 5-15 min.

Para a extracción convencional (para a comparación cos tratamentos de SE) pesáronse 4 g de VP para 40 mL de auga destilada, nunha incubadora con axitación (200 rpm) a unha temperatura de 50 °C durante 24 h. Unha vez rematadas as extraccións, o sólido separouse do líquido mediante a filtración (20-25 µm). As extraccións realizaranse por triplicado.

A táboa 2 mostra a combinación dos tratamentos aplicados.

Táboa 2. Condicións das extraccións realizadas no proceso de explosión de vapor

Núm. do experimento	Técnica	Temperatura	Tempo
1		170 °C	5 min
2		170 °C	10 min
3		170 °C	15 min
4		190 °C	5 min
5	Explosión de vapor	190 °C	10 min
6		190 °C	15 min
7		210 °C	5 min
8		210 °C	10 min
9		210 °C	15 min
10	Extracción convencional	50 °C	24 h

2.3.2 Estudo de extracción de compostos fenólicos con quecemento óhmico en GP

Para experimentos de OH (7 - 14 V/cm), a fonte de enerxía funcionou cunha onda sinusoidal a 25 kHz, orixinada a partir dun xerador de funcións (Agilent 33220A, 1 Hz - 25 MHz e 1 - 10 V; Penang, Malaisia) amplificada por un amplificador de potencia (Peavey CS3000, Meridian, MS, EUA). A temperatura controlouse cun termopar de aceiro inoxidable tipo K (Omega Engineering, Inc., Stamford, CT, EUA) colocado no centro

do reactor. Durante os tratamentos de OH, utilizouse un osciloscopio (ScopeMeter R 125/S, Fluke, WA, EUA) para detectar a frecuencia eléctrica, a voltaxe e a intensidade de corrente. Para as extraccións térmicas convencionais (CH, 0 V/cm) utilizouse un sistema de auga con circulación termostática (F25-ED, Julabo, Seelbach, Alemaña).

Para as extraccións mesturáronse 15 g de GP con 150 mL de disolvente (auga ou etanol 50 %, v/v). As extraccións realizáronse nun reactor cilíndrico de vidro con camisa de auga de dobre parede (con dous eléctrodos de aceiro inoxidable revestidos con politetrafluoroetileno) a 50 ou 80 °C durante 30 ou 60 min cun axitador magnético a 150 rpm. Antes de cada experimento, a condutividade eléctrica axustouse a $3,0 \pm 0,1$ mS/cm usando NaCl (HANNA Instruments Inc., edge, HI2003, EUA). Os extractos obtidos filtráronse a través de papel de filtro de 10 μ m. Os extractos gardáronse a 4 °C e algúns secáronse por liofilización. As extraccións realizáronse por triplicado.

2.4 Caracterización dos extractos da VP e do GP

2.4.1 Contido de compostos fenólicos, flavonoides e antocianinas totais

O contido total de compostos fenólicos (TPC) dos extractos foi medido polo método Folin-Ciocalteu, que consiste na reacción colorimétrica de redución/oxidación dos fenóis [15]. Utilizouse ácido gálico para realizar unha recta de calibración ($R^2 = 0,996$) e os resultados expresáronse como miligramos de equivalentes de ácido gálico (GAE) por cada gramo de biomasa seca.

O contido total de flavonoides (TFC) determinouse mediante un método colorimétrico de cloruro de aluminio [15]. A recta de calibración desenvolveuse usando (+)-catequina (5-500 mg/L, $R^2 = 0,997$) e os resultados foron reportados como mg de equivalentes de catequina (CE) por cada g de biomasa seca.

O contido de antocianinas totais (TA) cuantificouse en extractos líquidos de GP mediante o método da diferenza de pH (AOAC, 2005) [16]. O contido de antocianinas representouse como equivalentes de cianidin-3-glicósido (cyd-3-glu) por gramo de GP seco (mg cyd-3-gluE/g GP).

A identificación e a cuantificación de compostos fenólicos individuais realizáronse utilizando un cromatógrafo Shimadzu Nexpera X2 UPLC equipado con detector de matriz de díodos (DAD) (Shimadzu, SPD-M20A, Columbia, MA, EUA). Foi usado para separar unha columna Aquity BEH C18 (2,1 mm \times 100 mm, tamaño de partícula

de 1,7 μm) (Waters, Milford, MA, EUA) e unha fase móbil composta por ácido fórmico ao 0,1% en auga e acetonitrilo a un caudal de 0,4 mL/min. A temperatura do forno foi de 40 °C e o volume de inxección da mostra, 5 μL . Identificáronse e cuantificáronse os compostos fenólicos mediante a comparación dos espectros UV e os tempos de retención con estándares comerciais.

2.4.2 Contido en oligosacáridos e derivados

Os monosacáridos e ácidos orgánicos do extracto líquido da VP analizáronse por HPLC (Agilent 1200 series, Palo Alto, CA, EUA; inxección de 5 μL de mostra nunha columna Rezex ROA Organic Acid H⁺ –Phenomenex– a 60 °C, fase móbil de ácido sulfúrico 3 mM a 0,6 mL/min, detector de índice de refracción a 35 °C). Outra alícuota do extracto líquido foi sometida a posthidrólise ácida (ácido sulfúrico 4%, 121 °C durante 20 min), filtrada e inxectada en HPLC para determinar a cantidade de oligómeros como unha subtracción dos azucres obtidos da posthidrólise ácida e inxección directa.

2.4.3 Actividade antioxidante

A capacidade antioxidante dos extractos foi medida en extractos líquidos mediante tres ensaios diferentes: ensaio de eliminación de radicais α,α -difetil- β -picrilhidrazilo (DPPH), o ensaio de decoloración de radicais do ácido 2,2-azino-bis-3-etilbenzotiazolína-6-sulfónico (ABTS) e o poder antioxidante redutor férrico (FRAP), usando Trolox como estándar (equivalente a Trolox, TE) e sulfato de ferro (FeSO_4) [13, 15]. As análises das mostras realizáronse por triplicado.

2.5 Morfoloxía da biomasa

As análises morfolóxicas da VP e do GP realizáronse nun microscopio electrónico de varrido con emisión de campo de ultra alta resolución (FEG-SEM; NOVA 200 Nano SEM, FEI Company, Hillsboro, Oregon, EUA) aplicando unha tensión de aceleración de 10 kV. Todas as imaxes SEM foron adquiridas mediante o detector de electróns secundarios. As mostras de biomasa seca (tratada e non tratada) foron recubertas cunha película de Au-Pd.

2.6 Dixestión in vitro e bioaccesibilidade dos compostos fenólicos do GP

Neste traballo, empregouse un protocolo estático posto a disposición polo grupo de consenso internacional INFOGEST [17] para simular a dixestión gastrointestinal humana (GID). Preparouse un fluído salival simulado para a dixestión oral (SSF), gástrica (SGF) e intestinal (SIF). O ensaio realizouse a 37 °C baixo axitación (150 rpm), usando un baño de auga. Simuláronse os pasos orais, gástricos e intestinais durante 2 min, 2 h e 2 h, respectivamente.

Para a toma de mostras, recolléronse alícuotas (2,0 mL) ao final das fases oral e gástrica. As alícuotas recollidas e a fase intestinal final filtráronse (0,22 µm), conxeláronse (-20 °C) e utilizáronse para as análises posteriores de fenólicos (TPC, TA e HPLC) e de antioxidantes. As dixestións in vitro realizáronse polo menos por triplicado.

O índice de bioaccesibilidade dos compostos fenólicos determinouse segundo a seguinte ecuación:

$$\text{Índice de bioaccesibilidade (\%)} = \frac{FCd}{FCa} \times 100$$

onde FCd, contido fenólico despois da dixestión; FCa, contido fenólico antes da dixestión.

2.7 Efecto do GP na viabilidade celular e prevención do estrés oxidativo

A toxicidade do extracto de GP liofilizado (GPE) [obtido por OH usando etanol 50 % (v/v), 80 °C durante 30 min] foi avaliada in vitro usando dúas liñas celulares normais: fibroblastos de rato (L929, ATCC® CCL-1) e ril embrionario humano (HEK293T, ATCC® CRL-11268) e dúas liñas de células cancerosas: liñas de células colorrectais humanas (Caco-2, ATCC® HTB-37™) e adenocarcinoma do colo do útero humano (HeLa, ATCC® CCL-2™). As células foron cultivadas mediante incubación a 37 °C nunha atmosfera humidificada cun 5 % de CO₂ durante 48 h [13]. Despois, as células sementáronse nunha placa de 96 pozos a unha densidade de 1 × 10⁵ células por pozo durante 24 h e logo incubáronse con GPE diluído en DMEM suplementado en concentración entre 25 e 4000 µg/mL durante 36 h (DMEM suplementado usado como control). Despois da incubación, determinouse a viabilidade celular mediante o método de resazurina [13] e detectouse o produto fluorescente rosa resultante (resorufin) mediante un lector de

microplacas a 560 nm (λ_{ex}) e 590 nm (λ_{em}). A viabilidade celular (%) obtívose restando datos en branco (medio libre de células) e comparando cos controis non tratados.

Para determinar os niveis intracelulares de ROS en células L929 e HeLa, utilizouse un kit comercial (ab 113851, DCFDA/H2DCFDA-Cellular ROS Assay Kit de Abcam plc®, Cambridge, Reino Unido). Para o tratamento, empregáronse dúas doses (100 e 250 $\mu\text{g/mL}$) de GPE liofilizado [obtido por OH usando etanol 50 % (v/v), 80 °C durante 30 min] e durante 8 h. Despois, as células incubáronse con 25 μM de diacetato de diclorofluoresceína (DCFDA) durante 45 min a 37 °C. Utilizouse peróxido de hidróxeno tertbutil (TBHP, 100 μM) diluído en PBS para inducir ROS durante 1 h. A intensidade de fluorescencia resultante foi medida a lonxitudes de onda de 485 nm (λ_{ex}) e 535 nm (λ_{em}), e considerouse un reflexo do nivel total de ROS intracelular. Cada experimento realizouse por triplicado.

2.9 Avaliación do impacto socioeconómico da revalorización dos refugallos xerados no sector vitivinícola na provincia de Ourense

Dende o punto de vista económico, o plan de negocio ten como obxectivo a análise dos modelos que se desenvolverán a partir da obtención de produtos de base biolóxica, considerando diferentes criterios que permitan verificar a súa viabilidade comercial, técnica e económica: o valor actual neto, a taxa interna de retorno, ou valoracións e auditorías sobre sistemas de xestión medioambiental ou responsabilidade social corporativa. Por tanto, a utilidade ou a achega de valor do proxecto e o plan de negocio é dobre. Por unha banda, serve para valorar a coherencia interna do proxecto, mesmo en termos de diferenciación da empresa no mercado, como na xeración de novos produtos e a contribución á sustentabilidade a longo prazo das empresas no espazo territorial. Por outra banda, permite que outros axentes externos ou internos, que definiremos como partes interesadas no eido académico empresarial, dentro das teorías da axencia, dos custos de transacción e en relación coas externalidades derivadas, como poden ser accionistas, investidores, colaboradores, empregados, clientes, distribuidores, provedores, administracións públicas, sindicatos, clústeres sectoriais ou centros de formación e investigación vencellados ao sector agroalimentario.

O plan de negocio incluíra as seguintes partes:

1. Identificación e xustificación do proxecto baseándose nos seus obxectivos.
2. Análise da viabilidade comercial. Esta demostrará que existe un mercado potencial para os produtos de base biolóxica ofertados. Por iso, será necesario analizar a situación actual do sector, así como as perspectivas futuras (identificando os clientes potenciais, competencia, provedores, distribuidores...). Unha vez feita esta primeira análise, establecerase un plan de mercadotecnia que, baseándose nas características dos produtos, permita definir estratexias de prezos, promoción e distribución. Finalmente, é fundamental levar a cabo a análise das debilidades, ameazas, fortalezas e oportunidades que implica o proxecto de negocio.
3. Análise técnica. Para verificar a viabilidade técnica do proceso, valóranse aspectos como a localización, o proceso produtivo, as necesidades de persoal, os custos operativos, e elaborar un estudo de carácter administrativo e legal.
4. Viabilidade económico-financeira. Esta análise debe mostrar a rendibilidade do negocio, así como os riscos económicos e financeiros. Por iso, avalíanse os investimentos necesarios, as fontes de financiamento, a rendibilidade do proxecto e faise unha análise dos riscos.

3 Resultados e discusión

3.1 Composición dos residuos vitivinícolas: o GP e a VP

Os resultados mostran que a principal fracción do GP son os extractivos (acuosos cun 22,6 % e etanólicos cun 37,7%), seguidos da lignina (24 %) e das proteínas (11,7 %). Ademais, o GP presenta pouca cantidade de azucre (figura 2A). En canto á VP (figura 2B), os polisacáridos están constituídos principalmente por glucano (celulosa) cun valor do 32,4 % e hemicelulosas (que corresponden á suma de xilano, arabinano e os grupos acetil), cun valor de 15,4 %. En canto ao segundo compoñente máis abundante na VP, a lignina, acada un valor do 23,7 % (tendo en conta a lignina de Klason e a soluble en ácido). Ademais, destacan os extractivos etanólicos e os ácidos urónicos, que corresponden ao 14,1% e ao 9,3 % da masa de VP, respectivamente, mentres que outros compoñentes se atopan en menor medida.

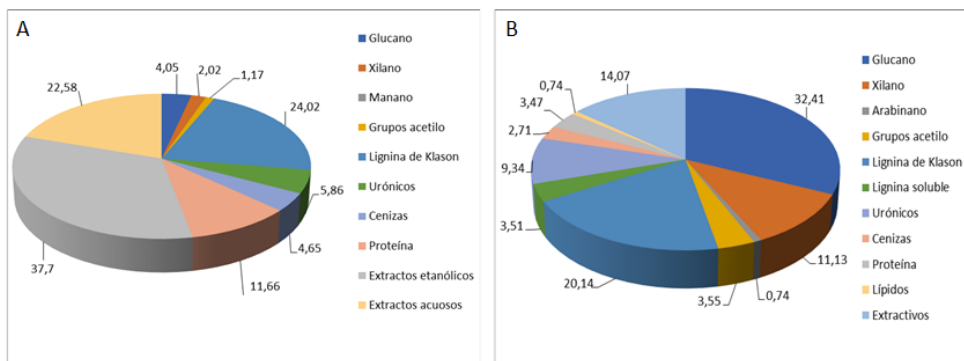


Figura 2. Composición do GP (A) e VP (B). Os valores están expresados en g/100 g de biomasa seca

3.2 Fraccionamento das podas de vide por medio de explosión de vapor

O proceso de extracción por SE baséase no uso de vapor de auga que produce alta presión interna nas células vexetais que conduce á liberación de compostos intracelulares. A SE empregouse recentemente para extraer compostos bioactivos de materiais vexetais como compostos fenólicos e oligosacáridos [18].

O deseño e a optimización de parámetros de extracción, así como a temperatura e o tempo de procesamento, son fundamentais para obter rendementos óptimos e evitar a degradación dos compostos de interese. Por iso, este proxecto foi deseñado para estudar a influencia das condicións de tempo e temperatura asociadas ao proceso de extracción de SE para recuperar compostos bioactivos, é dicir, oligosacáridos e compostos fenólicos, e para obter un sólido rico en azucres fermentables para producir bioetanol (táboa 2). Os extractos obtidos por SE comparáronse cos obtidos tras unha extracción convencional (50 °C durante 24 h) como control.

3.2.1 Composición en oligosacáridos e derivados

A figura 3A mostra a suma de oligosacáridos e monosacáridos de glicosa, xilosa e arabinosa presentes nos licores. Neste caso, destaca a alta solubilización de monosacáridos e oligosacáridos de glicosa, cun contido que oscila entre 3,36 (experimento 8) e 12,39 (experimento 2) mg/g VP. Comparativamente coa extracción convencional, acadouse un contido de 8,89 mg/g de vide. As condicións que permitiron unha maior recuperación da xilosa foron 195 °C durante 10 e 15 min e 210 °C durante 5 min en SE, e acadáronse valores de 6,97-8,23 mg/g VP. Por outra banda, na extracción

convencional obsérvase un menor rendemento de recuperación de azucre na VP. Estes resultados levan a afirmar que o tratamento con SE é máis eficaz para a extracción de oligosacáridos de VP. A arabinosa está presente en todos os extractos obtidos, pero en baixas concentracións (<2 mg/g VP).

Tendo en conta a composición de monosacáridos e de oligosacáridos, pódese concluir que os extractos obtidos conteñen unha interesante cantidade de derivados de glucano e de xilano que poden ter actividades biofuncionais como antioxidantes e prebióticos, entre outros.

A figura 3B mostra o contido de ácidos derivados da degradación dos azucres. Cos resultados presentados, pode observarse que a extracción asistida por SE a temperaturas máis altas (190 e 210 °C) e con maior tempo de exposición (10 e 15 min) conduce á solubilización dos grupos acetilo contidos nas hemicelulosas a ácido acético.

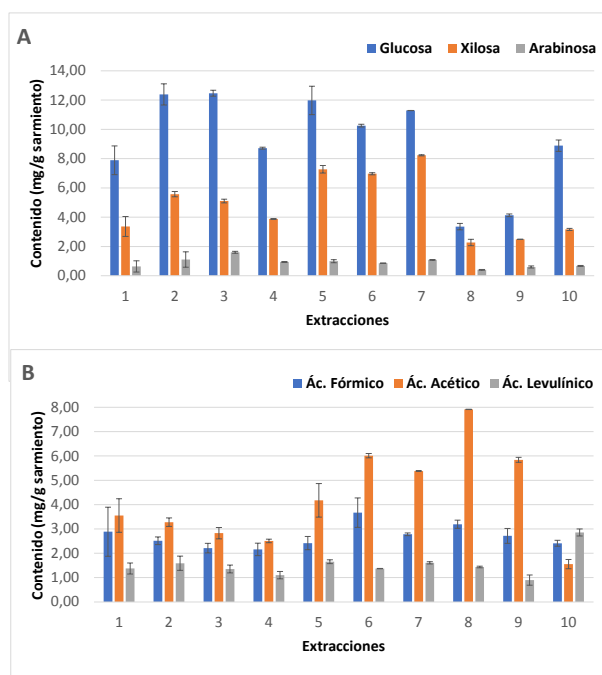


Figura 3. Composición dos oligosacáridos (A) e ácidos (B) dos extractos obtidos por SE (1-9) e por extracción convencional (10). Lenda na táboa 2

3.2.2 Contido en compostos fenólicos e flavonoides

O contido de TPC preséntase na figura 4A. Os valores de TPC varían entre 1,74-12,20 mg GAE/g VP. En xeral, obsérvase que un aumento da temperatura e do

tempo de reacción están estreitamente ligados a unha maior recuperación dos compostos fenólicos. Por exemplo, a temperaturas de 170 e 190 °C, períodos de extracción máis longos favorecen a obtención de máis compostos fenólicos. Pola contra, á temperatura de 210 °C ocorre o contrario. O tempo máis curto (5 min) permite obter o máximo contido de fenólicos (12,20 mg ácido gálico equivalente (GAE)/g VP), mentres que en períodos máis longos (10 e 15 min) o contido fenólico diminúe moito. Estes resultados indican que, en tempos longos de extracción e altas temperaturas, gran parte dos compostos fenólicos se degradan. En canto á extracción convencional, acadouse un contido en compostos fenólicos de 2,94 mg GAE/g.

Por outra banda, o TFC (figura 4B) varía entre 0,65-3,67 mg rutina equivalente (RE)/g VP. Neste caso, obsérvase un comportamento similar ao do TPC. A unha temperatura de 170 °C, o contido de TFC aumenta co tempo de exposición. Pola contra, a temperaturas de 190 e 210 °C, obsérvase que o aumento dos tempos de reacción xera a degradación dos flavonoides, posto que diminúen. No caso da extracción convencional, alcanzouse un valor de 2,07 mg RE/g.

Os resultados de TPC e TFC permiten concluír que a tecnoloxía de SE permite unha recuperación máis eficiente dos compostos fenólicos e a mellor condición é a 210 °C durante 5 min.

Para esta condición óptima, os compostos fenólicos foron identificados e cuantificados por HPLC-MS e detectáronse ácido p-cumárico ($65,3 \pm 3,17 \mu\text{g/L}$), 3,4-dihidroxibenzoico ($623,03 \pm 9,38 \mu\text{g/L}$), gálico ($24 \pm 0,7 \text{ mg/L}$), salicílico ($109,2 \pm 8,87 \mu\text{g/L}$), 4-hidroxibenzoico ($25,11 \pm 2,53 \mu\text{g/L}$), vainílico ($9,0 \pm 0,3 \text{ mg/L}$) e a rutina ($10,28 \pm 0,74 \mu\text{g/L}$).

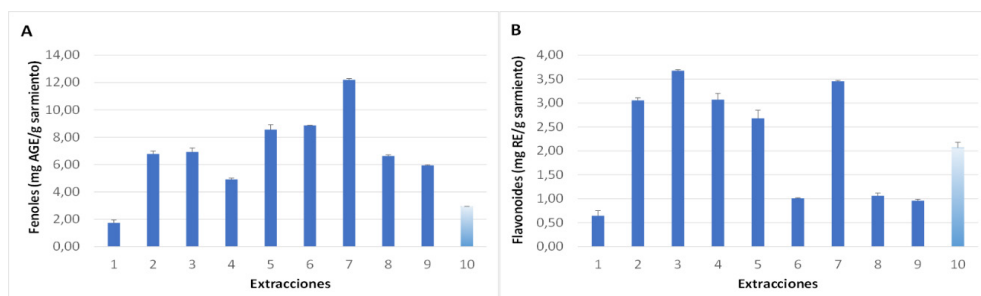


Figura 4. Compostos fenólicos totais (A) e flavonoides (B) cuantificados nos extractos obtidos por explosión de vapor (1-9) e extracción convencional (10). Lenda na táboa 2

3.2.3 Actividade antioxidante

Os resultados da actividade antioxidante (medida por FRAP, ABTS e DPPH) dos extractos obtidos por diferentes condicións de SE e extracción convencional preséntanse na figura 5.

Os datos obtidos sobre a capacidade antioxidante co método DPPH oscilan entre 2,91 mg trolox equivalente (TE)/g VP no extracto obtido nas condicións do experimento 1 (170 °C durante 5 min) ata 11,06 mg TE/g VP na extracción por SE do experimento 7 (210 °C durante 5 min).

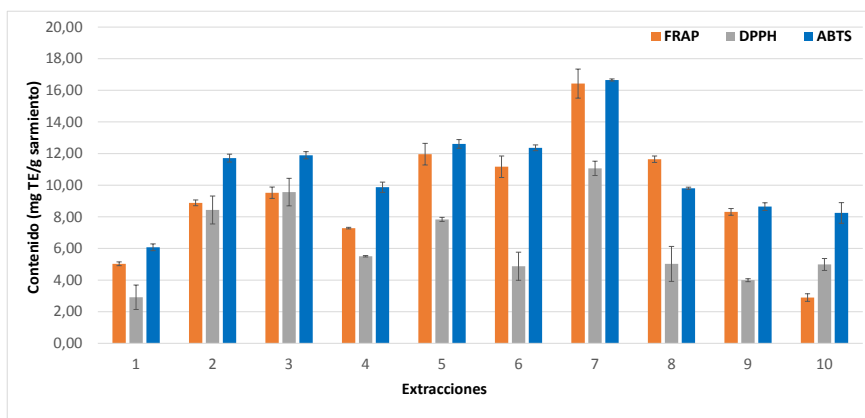


Figura 4. Actividade antioxidante dos extractos obtidos por SE (1-9) e extracción convencional (10). Lenda na táboa 2

Como ocorre no método do DPPH, as maiores cuantificacións da capacidade antioxidante polo método ABTS obsérvanse no experimento 7, que presenta 16,65 mg TE/g VP coas condicións de 210 °C durante 5 min. Por outra banda, obsérvase que os extractos obtidos por extracción convencional presentan baixos valores de actividade, de 4,99 mg TE/g VP para DPPH e 8,25 mg TE/g VP para ABTS. Ademais, os resultados da actividade antioxidante mediante o método DPPH e ABTS seguen a mesma tendencia ca o contido fenólico total (figura 4A).

Finalmente, os valores obtidos co método FRAP confirman, unha vez máis, que o extracto obtido despois do experimento 7 por SE, acada o valor máis alto con 16,42 mg TE/g VP, ao ser o mínimo o obtido despois do experimento 1 con 5,03 mg TE/g VP. Neste método, a extracción convencional amosou os valores máis baixos de poder reductor (2,90 mg TE/g VP) entre todas as condicións probadas.

3.2.4 Morfoloxía da poda de vide

Na figura 6 obsérvanse varios cambios na estrutura da VP tratada con SE (210 °C/5min), comparada coa biomasa non tratada. Os cambios estruturais son claros do tratamento con SE, especialmente a desintegración da parede celular e as estruturas porosas aumentadas.

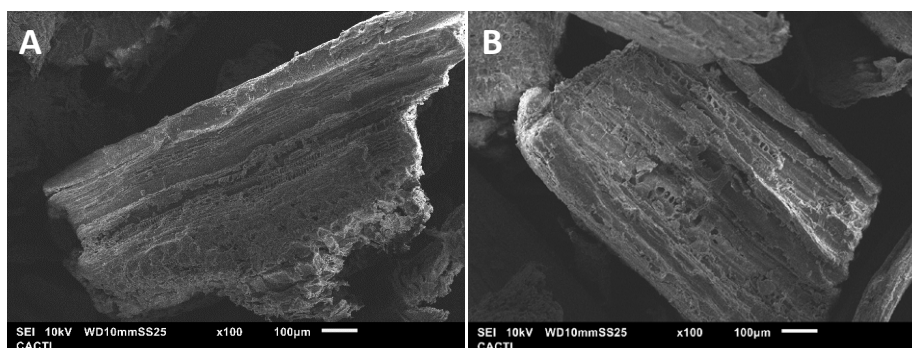


Figura 6. Micrografías realizadas mediante microscopía electrónica de varrido de mostras de VP sen tratar (A) e tratada con SE a 210 °C por 5 min (B)

3.3 Estudo de recuperación de compostos fenólicos antioxidantes de bagazo de uva tinta mediante quecemento óhmico

3.3.1 Condicións de extracción e cambios morfolóxicos na biomasa

Os resultados obtidos para as diferentes condicións de extracción, é dicir, tipo de disolvente, temperatura (50 e 80 °C) e tempo (30 e 60 min), probados no proceso de extracción por OH, represéntanse na táboa 3.

A extracción hidroetanólica a 80 °C durante 60 min presentou un maior rendemento de extracción e un menor contido en compostos fenólicos antioxidantes. Porén, observouse maior selectividade e menor degradación para a extracción hidroetanólica a 80 °C durante 30 min, cun maior contido en compostos fenólicos (TPC, TFC e TA) tendo, como era de esperar, unha maior capacidade antioxidante medida por DPPH e FRAP. En xeral, pode dicirse que a solución hidroetanólica foi máis eficiente ca a auga na recuperación dos compostos obxectivo.

Deste xeito, seleccionouse a condición de extracción, auga:etanol (50:50 (v/v)) a 80 °C durante 30 min para comprender mellor a influencia dos campos eléctricos (OH) na extracción de compostos fenólicos. Para iso, realizouse un control en condicións

seleccionadas sen a aplicación de campos eléctricos, CH (0 V/cm). Ao comparar o rendemento de extracción obtido mediante os dous métodos de extracción, OH e CH, está claro que a extracción térmica asistida por OH deu lugar a un maior rendemento de extracción ($21,0 \pm 0,5$ % para CH e $26,7 \pm 0,5$ % para OH). Este aumento pode deberse á integridade da parede celular comprometida polo efecto simultáneo do aumento da temperatura interna (efecto Joule) e da permeación, debido a campos eléctricos (efecto de electropermeabilización). A combinación destes dous mecanismos deu lugar a un aumento do contacto disolvente-mostra, mellorando a recuperación de compostos intracelulares, como os compostos fenólicos.

Na figura 7 é posible identificar varios cambios na estrutura do GP tratado con CH e OH. Os cambios estruturais son claros tras a aplicación de OH, especialmente a desintegración da parede celular e as estruturas porosas (fenómeno de electroporación), o cal facilitaría a migración de compostos fenólicos intracelulares (figura 7C).

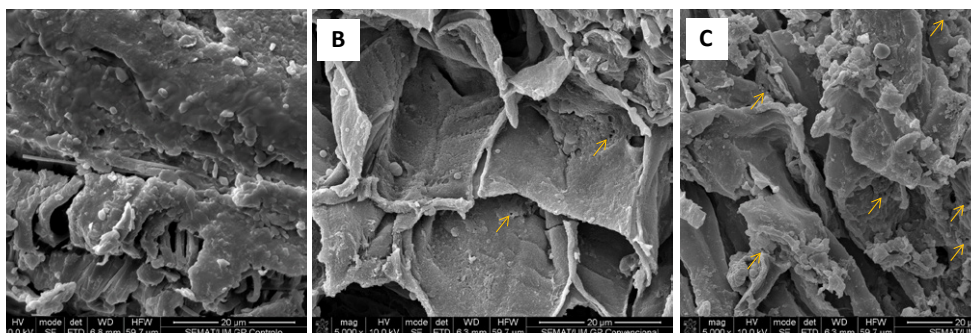


Figura 7. Micrografías realizadas mediante microscopia electrónica de varrido de mostras de GP sen tratar (A), tratada con queceamento convencional (B) e tratada con OH (C)

Neste estudo, a influencia do OH é clara, especialmente na fragmentación do GP (figura 7), na composición e no espectro de bioactividades dos extractos obtidos (figura 8).

A figura 8 mostra o efecto de ambos os tratamentos térmicos –OH e CH– sobre o contido fitoquímico e a capacidade antioxidante dos extractos obtidos do GP (condicións de extracción: mestura de 15 g de GP seco con 150 mL de disolvente hidroetanólico 50 % (v/v) a 80 °C durante 30 min). Observáronse diferenzas significativas entre os métodos de extracción para todos os parámetros estudados (TPC, TFC, TA e actividade antioxidante). A extracción asistida por OH proporcionou unha

concentración significativamente maior de compostos fenólicos ca a obtida por CH. Así, no caso do TPC, o emprego de campos eléctricos continuos a 14 V/cm permitiu un incremento do 40 % na extracción total de compostos fenólicos en comparación co tratamento térmico convencional; e do 44 % no contido de flavonoides ($37,98 \pm 2,3$ vs $26,32 \pm 1,4$ mg CE/g GP, para OH e CH, respectivamente). Ademais, o contido en antocianinas (TA), cuantificado polo método estándar de pH diferencial, demostrou que a aplicación desta tecnoloxía innovadora permitiu un aumento do 60 % na recuperación de pigmentos bioactivos dos residuos de viño.

A actividade antioxidante do extracto obtido medida por DPPH e FRAP (figura 8), indica a presenza de moléculas antioxidantes con alta actividade de eliminación de radicais libres e acción de poder reductor. Nos dous ensaios de antioxidantes, o extracto obtido a partir de biomasa procesada con OH amosou maior capacidade antioxidante (60 % para DPPH e 46 % para FRAP, respectivamente) ca as mostras obtidas por CH.

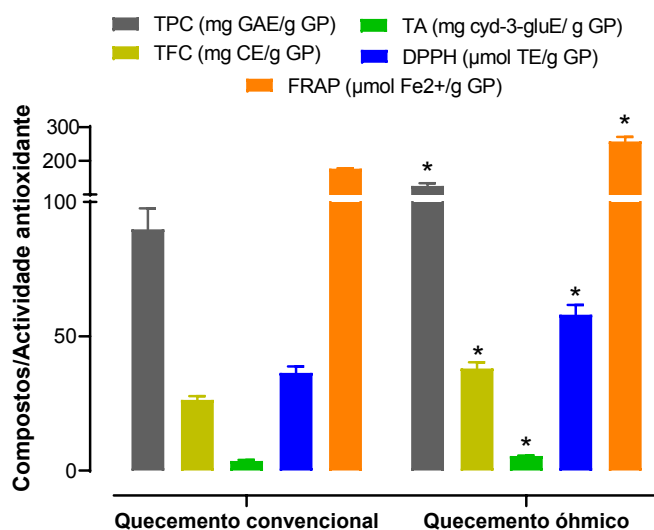


Figura 8. Contido fenólico e capacidade antioxidante dos extractos de bagazo de uva (GP) obtidos de diferentes tratamentos (CH e OH) para as condicións seleccionadas (disolvente hidroetanólico 50 % (v/v) a 80 °C durante 30 min). TPC: contido fenólico total; TFC: contido total de flavonoides; TA: antocianinas totais; DPPH (actividade de eliminación radical) e FRAP (poder reductor antioxidante)

*Significativamente diferente do quecemento convencional para o mesmo ensaio

Táboa 3. Rendemento da extracción, contido fenólico total (TPC), flavonoides (TFC), antocianinas (TA) e actividade antioxidante (DPPH e FRAP) dos extractos de GP obtidos por OH para as diferentes condicións de extracción estudadas

Disolvente	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendemento (%)	TPC (mg GAE/g GP)	TFC (mg CE/g GP)	TA (mg Cvd-3-gluE/g GP)	DPPH (µmol TE/g GP)	FRAP (µmol Fe ²⁺ /g GP)
H ₂ O	50	30	10,25 ± 0,15 ^a	18,72 ± 0,15 ^a	3,05 ± 0,05 ^a	1,07 ± 0,04 ^a	10,81 ± 0,07 ^a	30,85 ± 0,45 ^a
		60	13,85 ± 0,05 ^b	21,81 ± 1,55 ^b	3,23 ± 0,11 ^a	1,04 ± 0,06 ^a	10,08 ± 0,05 ^a	35,35 ± 1,73 ^b
	80	30	16,75 ± 0,15 ^c	33,40 ± 0,14 ^c	7,03 ± 0,71 ^b	1,90 ± 0,07 ^a	16,41 ± 0,37 ^b	53,38 ± 1,12 ^c
		60	17,95 ± 0,35 ^{cd}	28,27 ± 1,3 ^d	5,75 ± 0,26 ^c	1,43 ± 0,13 ^a	15,15 ± 0,08 ^b	27,97 ± 2,64 ^d
EtOH 50%	50	30	18,73 ± 0,10 ^d	66,37 ± 0,85 ^e	16,81 ± 0,37 ^d	5,00 ± 0,04 ^b	38,95 ± 1,43 ^c	152,74 ± 5,71 ^e
		60	20,02 ± 0,30 ^e	76,07 ± 3,33 ^f	18,48 ± 0,21 ^e	5,33 ± 0,05 ^b	46,83 ± 0,28 ^d	173,74 ± 4,86 ^f
	80	30	26,72 ± 0,50 ^e	125,78 ± 7,69 ^g	37,98 ± 2,34 ^f	5,49 ± 0,16 ^b	58,05 ± 3,62 ^e	257,67 ± 9,53 ^g
		60	28,63 ± 0,10 ^f	89,33 ± 0,68 ^h	29,71 ± 1,68 ^g	4,81 ± 0,27 ^b	48,24 ± 0,70 ^d	184,74 ± 3,86 ^f

Os valores dos datos exprésanse como media ± desviación estándar. As letras minúsculas diferentes (a-h) representan diferenzas estatísticas entre as diferentes condicións de extracción para o mesmo ensaio mediante a análise da varianza (ANOVA) seguida da proba de comparacións múltiples de Tukey (p < 0,05). DPPH: actividade de eliminación de radicais libres; FRAP: poder reductor antioxidante

3.3.2 Dixestión *in vitro* e bioaccesibilidade dos compostos fenólicos

Sábese que varias reaccións bioquímicas (por cambios de pH, enzimas, sales etc.) teñen un papel no metabolismo e biotransformación dos compostos fenólicos no corpo humano, o que ten como resultado unha maior solubilidade das moléculas bioactivas e, polo tanto, un cambio na súa distribución, absorción e excreción [19]. Neste traballo, avaliáronse os constituíntes fenólicos (TPC, TA e perfil fenólico por HPLC-DAD) e a actividade antioxidante (FRAP e DPPH) para comprender as alteracións observadas no extracto de GP promovidas polo proceso dixestivo. Os resultados móstranse na táboa 4. Como se pode ver, o GID aumentou considerablemente a concentración de compostos fenólicos, de 511 a 535 mg GAE/g extracto, representando unha bioaccesibilidade do 122 %, o cal suxire a biotransformación de fenólicos de alto peso molecular cara á súa despolimerización para producir compostos máis sinxelos de baixo peso molecular. Porén, as antocianinas (TA) presentan un comportamento contrario xa que, neste caso, os extractos dixeridos mostraron unha concentración significativamente menor de TA ca o extracto non dixerido, cunha diminución do 83 % (bioaccesibilidade do 22 %).

Identificáronse dezaseis compostos fenólicos pertencentes aos grupos de ácidos, flavonoides e estilbenos. No extracto inicial (non dixerido), os flavonoides como catequina, rutina, quercetina, taxifolina, kaempferol, narinxena e apixenina son os compostos con maior contido, con concentracións que oscilan entre 3,43 e 28,26 mg/g en extracto seco.

Durante o GID *in vitro* simulado, incluíndo a boca (fase oral), o estómago (fase gástrica) e o intestino delgado (fase intestinal), observáronse cambios significativos na composición do bagazo en relación cos principais compostos fenólicos. Os resultados suxiren que grandes cantidades de flavonoides foron metabolizadas, biotransformadas ou degradadas durante a dixestión; agás a rutina e a apixenina, que aumentan a súa concentración ao final da dixestión nun 16 % e 27 %, respectivamente. Non se detectou catequina ao final da dixestión. Ao mesmo tempo, durante o proceso de dixestión, aumentou o contido de ácidos fenólicos tales como o eláxico, o 3,4-dihidroxibenzoico, o o-cumárico, o rosmarínico, o cafeico e o ferúlico (con excepción do ácido gálico e o ácido 2,5-dihidroxibenzoico), o cal suxire que moléculas máis grandes (flavonoides e estilbenos) foron biotransformadas en ácidos fenólicos máis sinxelos, favorecendo a súa bioaccesibilidade e consecuente absorción.

A propiedade máis estudada do extracto de GP é a súa capacidade antioxidante, que está relacionada coa presenza de alto contido fenólico. Non obstante, as comparacións

con outros traballos son difíciles debido á variedade de metodoloxías aplicadas para a extracción e a cuantificación de fitoquímicos, os estándares antioxidantes empregados e a materia prima (variedades de uva) [20, 21]. Cuantificouse o extracto non dixerido, que presentou valores antioxidantes de $95,55 \pm 1,4 \mu\text{mol TE/g}$ de extracto para DPPH e $247,83 \pm 0,2 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$ extracto para FRAP; e que, despois do GID, a capacidade de eliminación de radicais polo extracto de GP aumentou a $124,4 \pm 5,1 \mu\text{mol TE/g}$ (DPPH), e o seu poder antioxidante redutor mellorouse ata $321,8 \pm 9,9 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$ extracto. Isto concorda co aumento de TPC detectado e a bioaccesibilidade superior dos ácidos fenólicos despois do proceso de dixestión.

Táboa 4. Influencia da dixestión gastrointestinal in vitro na composición, actividade antioxidante e bioaccesibilidade do extracto fenólico de GP

Compoñentes	Non dixerido	Oral	Gástrico	Intestinal	Bioaccesibilidade (%)
TPC (mg GAE/g extracto)	$511,11 \pm 6,6$	$528,99 \pm 8,8$	$508,71 \pm 4,0$	$535,26 \pm 5,9^*$	122
TA (mg cyd-3-gluE/g extracto)	$48,29 \pm 1,2$	$45,22 \pm 2,4$	$37,41 \pm 4,1^*$	$8,27 \pm 0,5^*$	17
Compostos fenólicos individuais (mg/g extracto de GP)					
Ácidos fenólicos					
Ácido eláxico	$6,58 \pm 0,3$	$7,94 \pm 1,0$	$10,70 \pm 2,1^*$	$13,79 \pm 1,4^*$	210
Ácido rosmarínico	$2,57 \pm 0,2$	$2,96 \pm 0,3$	$5,6 \pm 0,5^*$	$10,37 \pm 3,1^*$	404
Ácido -3,4DHB	$1,03 \pm 0,1$	$0,95 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,01$	$2,92 \pm 0,2^*$	283
Ácido cafeico	$0,13 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01^*$	$0,92 \pm 0,02^*$	707
Ácido o-cumárico	$4,35 \pm 0,1$	$5,06 \pm 0,7$	$5,93 \pm 0,2^*$	$6,06 \pm 0,3^*$	139
Ácido gálico	$2,61 \pm 0,0$	$3,96 \pm 0,4$	$4,08 \pm 0,2^*$	n. d.	0
Ácido -2,5DHB	$1,50 \pm 0,0$	$2,31 \pm 0,01^*$	$4,21 \pm 0,2^*$	n. d.	0
Ácido ferúlico	$0,89 \pm 0,04$	$1,04 \pm 0,02$	$1,05 \pm 0,01$	$1,42 \pm 0,02^*$	156
Flavonoides					
Apixenina	$25,35 \pm 0,7$	$28,59 \pm 4,84$	$24,75 \pm 0,6$	$32,12 \pm 0,9^*$	127
Rutina	$5,19 \pm 0,1$	$1,89 \pm 0,04^*$	$2,79 \pm 0,02^*$	$6,01 \pm 0,2^*$	116
Quercetina	$3,58 \pm 0,2$	$3,22 \pm 0,1$	$2,12 \pm 0,3^*$	$1,20 \pm 0,01^*$	28
Taxifolina	$5,68 \pm 0,3$	$5,79 \pm 0,2$	$4,23 \pm 0,1$	$0,57 \pm 0,01^*$	10
Kaempferol	$5,32 \pm 0,06$	$5,58 \pm 0,3$	$3,89 \pm 0,1^*$	$1,44 \pm 0,2^*$	27
Narinxenina	$28,26 \pm 0,5$	$32,43 \pm 2,7$	$30,30 \pm 3,0$	$21,98 \pm 1,1^*$	78
Catequina	$3,43 \pm 0,02$	$4,50 \pm 0,12$	$5,26 \pm 0,3^*$	n. d.	0

Estilbenos					
Resveratrol	2,38 ± 0,2	1,99 ± 0,05	1,91 ± 0,04	1,58 ± 0,3*	67
Actividade antioxidante					
DPPH (μmol TE/g extracto)	95,55 ± 1,4	104,18 ± 5,6	79,63 ± 7,5	124,44 ± 5,1*	--
FRAP (μmol Fe ²⁺ /g extracto)	247,83 ± 0,2	290,99 ± 20,8*	304,12 ± 11,1*	321,77 ± 9,9*	--

Os valores dos compostos fenólicos exprésanse como media de concentración (mg/L) ± SD de tres experimentos; n. d.: non detectado; DHB: ácido dihidroxibenzoico.

*Significativamente diferente fronte ao extracto non dixerido

3.3.3 Viabilidade celular e prevención do estrés oxidativo

O extracto obtido por OH utilizando etanol 50 % (v/v), 80 °C durante 30 min ten unha alta actividade antioxidante, o que indica que pode ter un efecto beneficioso para a saúde humana. Unha das primeiras probas necesarias antes de considerar o uso do extracto de GP para o consumo humano é a avaliación da toxicidade e, para validar esta hipótese nunha primeira aproximación, neste traballo realizáronse varios estudos utilizando diferentes liñas celulares (cancerosas e non cancerosas).

Como se pode ver na figura 9A, as diferentes liñas celulares parecen metabolizar de forma diferente os compostos do extracto de GP estudado. As células de adenocarcinoma de colo de útero humano (HeLa) foron as máis susceptibles á presenza de extracto, mostrando a IC50 máis baixa (122,7 mg/mL), seguidas das células colorrectais humanas (Caco-2), cunha IC50 de 234,1 mg/mL. Curiosamente, ambas as liñas celulares derivan de tecido canceroso. Por outra banda, as liñas celulares non cancerosas, de ril embrionario humano (HEK293T) e fibroblastos de rato (L929), tiveron a IC50 máis alta, 431,4 mg/mL e 397,9 mg/mL, respectivamente. De feito, o IC50 de HEK293T (o máis alto) foi un 352 % superior ao de HeLa (o máis baixo). Este é un resultado moi importante, xa que mostra que, para a mesma concentración de extracto de GP, os compostos presentes provocan un efecto tóxico sobre as liñas celulares cancerosas, pero non sobre as liñas celulares non cancerosas, abrindo a porta ás terapias naturais contra o cancro, aínda que son necesarias máis análises.

A necesidade de desenvolver terapias máis eficientes e con menos efectos colaterais é de extrema importancia. O potencial dos fitoquímicos é recoñecido dende hai moitos anos, porén, o mecanismo subxacente é aínda pouco comprendido. Polo tanto, a capacidade antioxidante celular do extracto de GP foi avaliada en dúas liñas celulares,

unha normal (L929) e unha cancerosa (HeLa). Os resultados obtidos preséntanse na figura 9B. As células dispuxéronse en contacto con 29 mg/mL (100 μ M) de catequina e 100 e 250 mg/mL de extracto de GP por 8 h. Após este período, as células foron expostas a TBHP, o axente oxidante. Da mesma maneira ca a catequina, o extracto de GP foi capaz de protexer as células contra o poder oxidante do TBHP. Ao observar a figura 9B, é doado comprender que o perfil de produción de ROS foi semellante para ambas as liñas celulares.

Estes resultados demostran claramente os beneficios dos extractos de GP para previr diversas patoloxías asociadas ao estrés oxidativo, o cal xustificaría o seu uso na preparación de alimentos funcionais ou na formulación de nutracéuticos.

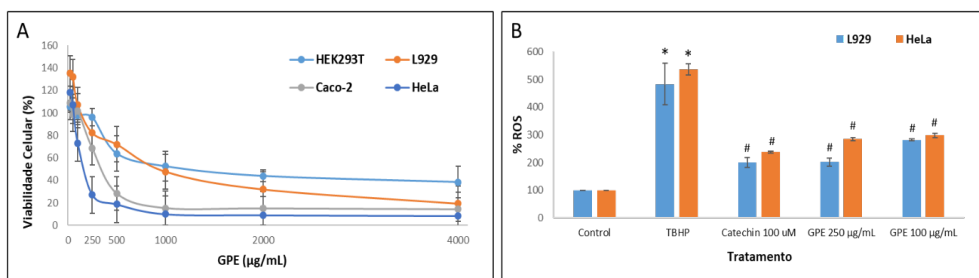


Figura 9. Viabilidade celular (A) e capacidade antioxidante celular (B), tratadas con diferentes concentracións de extracto de bagazo de uva obtido por quecemento óhmico. GPE: extracto de bagazo de uva tinta. #Significativamente diferente fronte ao control. *Significativamente diferente fronte ao TBHP (para a mesma liña celular)

3.4 Avaliación do impacto socioeconómico da revalorización dos refugallos xerados no sector vitivinícola na provincia de Ourense

Constatamos a existencia, no tecido produtivo vitivinícola ourensán, de todas as variables propias da «tripla hélice» para desenvolver a longo prazo fenómenos de concentración territorial, benestar e xeración de valor [22, 23, 24, 25] como son:

- A existencia de empresas cun número, tamaño, diferenciación e capacidade produtiva moi salientables (con múltiples denominacións de orixes e consellos reguladores, que empregamos como principais interlocutores).
- A existencia de universidades e centros de investigación na contorna, con potentes equipos de investigación cuns currículos envexables ligados á destacada investigación sobre refugallos, referentes na xestión e na investigación no eido turístico, na competi-

tividade e nos fenómenos de responsabilidade social corporativa integrados coa economía circular.

Actitude proactiva das administracións locais na contorna; neste caso salienta o papel dinamizador que está a xogar a Deputación de Ourense, nomeadamente a través do Inorde, así como os diferentes concellos da provincia e a Xunta de Galicia. Nos últimos tempos demostrouse o forte compromiso da deputación cos proxectos desenvolvidos na rexión.

Polo tanto, no ámbito socioeconómico, cóntase coas pezas necesarias, moitísima ilusión, pero tamén certo temor porque se puidese desaproveitar unha oportunidade única. Comeza o proceso de escoita e de axuste do proxecto circular ao nivel de implicación que manifesten e desexen as empresas, a través dos seus consellos reguladores das DO provinciais. Neste senso, propónse a ampliación de proxectos a outros subsectores agrogandeiros, como a pataca, a castaña, o aceite..., que xa teñen en marcha diferentes proxectos de valorización de refugallos. Existen enormes posibilidades de financiamento, proxectos previos, mercado non abastecido de biodiésel para vehículos e para a enerxía de quentamento de plantas produtivas, mesmo de vivendas de particulares, interese social, mellora da imaxe corporativa, un compromiso crecente dos operadores, sancións por contaminacións... O proceso é irreversible e é imprescindible determinar o xeito de tratar a valorización de refugallos no sector vitivinícola.

Sobre a base do cumprimento dos obxectivos parciais do proxecto, relativos á avaliación da composición química dos residuos, tras a etapa inicial de fraccionamento de refugallos, caracterizáronse diversos compostos bioactivos, que pechan o círculo de reciclaxe cunha proposta técnica de produción de bioetanol a partir de sólidos pretratados (datos experimentais non mostrado neste traballo). Neste senso, constátase a capacidade tecnolóxica e produtiva para separar refugallos e producir bioetanol, tanto para uso en maquinaria agrícola coma para outros sectores industriais. O custo mínimo aproximado dunha planta que incorpore procesos de separación de refugallos vitivinícolas ascende a 120 000 €, polo que consideramos necesario o desenvolvemento de proxectos cooperativos no sector (non ten sentido ningún que un colleiteiro, viticultor ou unha grande explotación con marcas propias asuma individualmente o fraccionamento, tratamento e reciclaxe dos seus propios refugallos). Neste eido, os consellos reguladores das diferentes DO deberían actuar como

dinamizadores e impulsores da constitución de plantas de reciclaxe, aproveitando as crecentes vías de subvención existentes na UE sobre sistemas de economía circular, como é o caso que nos ocupa. O procedemento antedito podería ampliarse para a separación de refugallos procedentes doutros subsectores da agricultura e da gandería ourensá. Con tales prácticas pretendemos pechar o ciclo de vida dos recursos naturais. Así, procuramos un aproveitamento integral dos residuos vitivinícolas, tan abundosos na nosa provincia, aumentando o capital natural e tendo en consideración o seu impacto socioeconómico, tanto nos seus habitantes coma no sector agrario; para afrontar os retos de Ourense. Este enfoque vai moito máis alá das prácticas existentes no sector, xa que permitirá un aumento da capacidade de innovación, da economía e da transferencia de coñecemento ás empresas e ao conxunto xeral da sociedade no territorio.

O proxecto máis ambicioso que se podería tratar na provincia de Ourense, respecto ao tratamento de refugallos vitivinícolas, consistiría na produción de bioetanol de segunda xeración (neste punto non se descarta engadir máis procesos de tratamento de refugallos no sector agroalimentario, sobre residuos en castañas, aceite..., en primeiro lugar; e noutros sectores estratéxicos da provincia, nun segundo paso). O obxectivo desta actividade é analizar as repercusións socioeconómicas no rural, dende o punto de vista do emprego local xerado cunha planta experimental de separación de refugallos, que podería ampliar a súa actividade, ata a produción de bioetanol para refugallos vitivinícolas (cunha estimación dun mínimo de 50 postos de traballo directos e ata 400 indirectos). Débese determinar se o custo de desprazamento de refugallos corre a conta do produtor ou se compensa co resultado obtido para autoconsumo. A proposta dunha primeira localización podería coincidir co Centro Agrogandeiro de Xinzo de Limia, o Centro Agroforestal de Riós ou ben calquera outro que xurda da negociación entre operadores para minimizar desprazamentos e custos loxísticos. Á devandita creación de postos de traballo deberían engadirse os ingresos e as prestacións para o pequeno comercio, desde o punto de vista dos consumidores e, máis globalmente, desde o punto de vista do desenvolvemento e benestar na provincia de Ourense. O desenvolvemento de produtos relacionados cun alto valor engadido pode ser unha oportunidade para o desenvolvemento sostible das zonas rurais a través da economía circular. A economía circular permite implantar o triplo aspecto da sustentabilidade e a

resiliencia nos sistemas produtivos mediante a reutilización de subprodutos, a redución do custo dos insumos e a reciclaxe dos residuos xerados nos procesos produtivos.

Unha proposta intermedia, máis asumible polos operadores, podería consistir unicamente na creación dunha planta para separar refugалlos, de xeito que algúns dos produtos xerados poderían ser aproveitados polas empresas vitivinícolas (biomasa para calefacción) e outros actuarían como insumos para outros operadores (bioetanol, licores etc.). En calquera caso, a xeración de valor e circularidade do proceso son moi claros.

No proceso comentado de tratamento de refugалlos constátanse os beneficios derivados da separación de refugалlos, así como a necesidade de promover encontros e xuntanzas con representantes do sector e coas institucións locais e rexionais co gallo de establecer prioridades de investimento e tratamento de refugалlos, a mobilización de esforzos e o máximo aproveitamento de axudas e liñas de subvención por parte de fondos da UE (ben sexa mediante recursos FEDER, NextGeneration, Interreg, proxectos transfronteirizos ou outros máis específicos sobre xestión medioambiental e economía circular).

A análise realizada dentro do proxecto sobre «Estratexias para a xestión sostible de refugалlos vitivinícolas na provincia de Ourense» optou por centrarse nos procesos de separación de refugалlos, do mesmo xeito que tratamos a valorización en termos de economía circular.

Levouse a cabo unha análise exhaustiva de múltiples propostas circulares, de tratamento de refugалlos en explotacións vitivinícolas e de adegas; na meirande parte de casos por iniciativa privada e ao abeiro de subvencións alleas, pero que seguen presentando un carácter anecdótico, por mor de eivas na colaboración de entidades ou espírito cooperativo e integrado no territorio.

Estase a traballar e prevese identificar algúns dos problemas adxacentes á xestión dos residuos agroindustriais, que reducen a sustentabilidade dos procesos agrícolas e a bioeconomía, así como os principais impactos negativos sobre o medio ambiente. Tras identificar estes problemas xunto cos viticultores da comarca de Ourense, deseñárase un modelo de xestión economicamente viable (plan estratéxico) para a valorización de alto impacto dos refugалlos xerados durante os procesos de elaboración do viño.

Neste eido, consideramos imprescindibles as propostas de plans de negocios de reciclaxe integrados nos diferentes consellos reguladores das denominacións de orixe

ourensás, aproveitando instalacións como as do Centro Agrogandeiro do Inorde, en Xinzo de Limia. En concreto, a Deputación de Ourense (por medio do Inorde), acaba de integrarse nas axudas do programa POCTEP 2021-2027 por un importe de máis de 1 150 000 €, dentro de plans de acción de economía circular da Unión Europea (axudas do FEDER) para proxectos de «Circular-Ecosystems». A idea sería comezar cunha planta piloto de tratamento de refugallos (podería valorarse a SE ou outros procesos alternativos) en Xinzo de Limia, en colaboración coas explotacións que desexen participar; para no medio prazo, ampliar espazos a máis centros de reciclaxe para o sector agrogandeiro das cabeceiras comarcais dependentes da Deputación de Ourense. Así, dende o punto de vista económico, o plan de negocio ten como obxectivo a análise dos modelos de negocio que se desenvolverán a partir da obtención de produtos de base biolóxica, tendo en consideración diferentes criterios que permitan verificar a súa viabilidade comercial, técnica e económica (principalmente as valoracións e as auditorías sobre sistemas de xestión medioambiental ou responsabilidade social corporativa). Por tanto, a utilidade ou a achega de valor do proxecto e o plan de negocio é dobre. Por unha banda, serve para valorar a coherencia interna do proxecto, mesmo en termos de diferenciación da empresa no mercado, como na xeración de novos produtos e a contribución á sostibilidade a longo prazo das empresas no espazo territorial. Por outra, permite que outros axentes externos ou internos (partes interesadas) se relacionen coas actividades deste proxecto, dentro das teorías da axencia, dos custos de transacción e en relación coas externalidades derivadas, como poden ser accionistas, investidores, colaboradores, empregados, clientes, distribuidores, provedores, administracións públicas, sindicatos, clústeres sectoriais ou centros de formación e investigación vencellados ao sector agroalimentario.

4 Conclusións

As tecnoloxías de SE e do OH son métodos efectivos e respectuosos co medio ambiente para procesar a biomasa lignocelulósica e son ferramentas útiles para recuperar compoñentes bifuncionais mediante o enfoque da biorrefinaría. Estas propiedades permiten empregar os extractos bioactivos de VP e de GP para formular alimentos (como ingredientes bioactivos, antioxidantes ou conservantes) e no sector nutracéutico. Ademais, os extractos de VP obtidos por SE teñen un maior potencial para ser empregados noutros sectores industriais, por exemplo na produción de biocombustibles.

Desde un punto de vista socioeconómico, a creación de produtos de valor engadido a partir de residuos agrícolas pode ser unha alternativa para o desenvolvemento sostible das zonas rurais, mediante o implante de estratexias baseadas na economía circular.

Agradecementos

O estudo contou co apoio do programa INOU da Deputación Provincial de Ourense e da Universidade de Vigo (proxecto INOU23-03). P. Ferreira-Santos agradácelle ao Ministerio de Ciencia, Innovación e Universidades o soporte económico posdoutoral (FJC2021-046978-I).

Referencias

- [1] FAOStat. (2022). Food and Agricultural Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- [2] World Wine production outlook OIV first estimates. (Issue October 2022). <https://www.oiv.int/es>
- [3] Análisis del comercio exterior. Informe de producto: Vino - Año 2022. <https://cpage.mpr.gob.es/>
- [4] Errichiello, F.; D'Amato, M.; Gambuti, A.; Moio, L.; Pastore, A.; AL-Hmadi, H.; Stornaiuolo, M.; Serino, E.; Tagliatalata-Scafati, O.; Forino, M. (2023). Oleanolic Acid: A Promising Antidiabetic Metabolite Detected in Aglianico Grape Pomace. *J. Funct. Foods*, 104, 105548.
- [5] Jesus, M.S.; Romaní, A.; Genisheva, Z.; Teixeira, J.A.; Domingues, L. (2017). Integral Valorization of Vine Pruning Residue by Sequential Autohydrolysis Stages. *J. Clean. Prod.*, 168, 74–86.
- [6] Beres, C.; Costa, G.N.S.; Cabezedo, I.; da Silva-James, N.K.; Teles, A.S.C.; Cruz, A.P.G.; Mellinger-Silva, C.; Tonon, R. V.; Cabral, L.M.C.; Freitas, S.P. (2017) Towards Integral Utilization of Grape Pomace from Winemaking Process: A Review. *Waste Manag.*, 68, 581–594.
- [7] Gullón, B.; Eibes, G.; Dávila, I.; Vila, C.; Labidi, J.; Gullón, P. (2017) Valorization of Vine Shoots Based on the Autohydrolysis Fractionation Optimized by a Kinetic Approach. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56, 14164–14171.
- [8] Dávila, I.; Gullón, B.; Labidi, J.; Gullón, P. (2019) Multiproduct Biorefinery from Vine Shoots: Bio-Ethanol and Lignin Production. *Renew. Energy*, 142, 612–623.

- [9] Ferreira-Santos, P.; Zanuso, E.; Genisheva, Z.; Rocha, C.M.R.; Teixeira, J.A. (2020) Green and Sustainable Valorization of Bioactive Phenolic Compounds from Pinus By-Products. *Molecules*, 25, 2931.
- [10] Milinčić, D.D.; Stanisavljević, N.S.; Kostić, A.Ž.; Soković Bajić, S.; Kojić, M.O.; Gašić, U.M.; Barać, M.B.; Stanojević, S.P.; Lj Tešić, Ž.; Pešić, M.B. (2021) Phenolic Compounds and Biopotential of Grape Pomace Extracts from Prokupac Red Grape Variety. *LWT*, 138, 110739.
- [11] Ferreira-Sousa, D.; Genisheva, Z.; Rodríguez-Yoldi, M.J.; Gullón, B.; Costa, C.E.; Teixeira, J.A.; Botelho, C.M.; Ferreira-Santos, P. (2024). Exploration of Polyphenols Extracted from Cytisus Plants and Their Potential Applications: A Review. *Antioxidants*, 13, 1–21.
- [12] Álvarez, C.; González, A.; Alonso, J.L.; Sáez, F.; Negro, M.J.; Gullón, B. (2020) Xylooligosaccharides from Steam-Exploded Barley Straw: Structural Features and Assessment of Bifidogenic Properties. *Food Bioprod. Process.*, 124, 131–142.
- [13] Ferreira-Santos, P.; Nobre, C.; Rodrigues, R.M.; Genisheva, Z.; Botelho, C.; Teixeira, J.A. (2024). Extraction of Phenolic Compounds from Grape Pomace Using Ohmic Heating: Chemical Composition, Bioactivity and Bioaccessibility. *Food Chem.*, 436, 137780.
- [14] Rocha, C.M.R.; Genisheva, Z.; Ferreira-Santos, P.; Rodrigues, R.; Vicente, A.A.; Teixeira, J.A.; Pereira, R.N. (2018). Electric Field-Based Technologies for Valorization of Bioresources. *Bioresour. Technol.*, 254, 325–339.
- [15] Ferreira-Santos, P.; Genisheva, Z.; Botelho, C.; Santos, J.; Ramos, C.; Teixeira, J.A.; Rocha, C.M.R. (2020). Unravelling the Biological Potential of Pinus Pinaster Bark Extracts. *Antioxidants*, 9, 334.
- [16] Ferreira-Santos, P.; Nogueira, A.; Rocha, C.M.R.; Wilson, C.P.; Teixeira, J.A.; Botelho, C. (2022). Sambucus Nigra Flower and Berry Extracts for Food and Therapeutic Applications: Effect of Gastrointestinal Digestion on in Vitro and in Vivo Bioactivity and Toxicity. *Food Funct.*, 13, 6762–6776.
- [17] Brodkorb, A.; Egger, L.; Alminger, M.; Alvito, P.; Assunção, R.; Ballance, S.; Bohn, T.; Bourlieu-Lacanal, C.; Boutrou, R.; Carrière, F.; et al. (2019). INFOGEST Static in Vitro Simulation of Gastrointestinal Food Digestion. *Nat. Protoc.*, 14, 991–1014.
- [18] Carvalho, A.F.A.; Marcondes, W.F.; de Oliva Neto, P.; Pastore, G.M.; Sandler, J.N.; Arantes, V. (2018). The Potential of Tailoring the Conditions of Steam Explosion to Produce Xylo-Oligosaccharides from Sugarcane Bagasse. *Bioresour. Technol.*, 250, 221–229.
- [19] Eker, M.E.; Aaby, K.; Budic-Leto, I.; Rimac Brnčić, S.; El, S.N.; Karakaya, S.; Simsek, S.; Manach, C.; Wiczkowski, W.; de Pascual-Teresa, S. (2020). A Review of Factors Affecting Anthocyanin Bioavailability: Possible Implications for the Inter-Individual Variability. *Foods*, 9, 2.

- [20] José Jara-Palacios, M.; Gonçalves, S.; Hernanz, D.; Heredia, F.J.; Romano, A. (2018). Effects of in Vitro Gastrointestinal Digestion on Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Different White Winemaking Byproducts Extracts. *Food Res. Int.*, 109, 433–439.
- [21] Taladrid, D.; González de Llano, D.; Zorraquín-Peña, I.; Tamargo, A.; Silva, M.; Molinero, N.; Moreno-Arribas, M.V.; Bartolomé, B. (2021). Gastrointestinal Digestion of a Grape Pomace Extract: Impact on Intestinal Barrier Permeability and Interaction with Gut Microbiome. *Nutrients*, 13, 2467.
- [22] Krugman, P. (1997). *Development, Geography and Economic Theory*. Cambridge: MIT Press. Obtenido de <http://www.economia.unam.mx/cedrus/descargas/GeographyPaul%20Krugman.pdf>
- [23] Etzkowitz, H. y Zhou, C. (2006): "Triple Helix twins: innovation and sustainability", *Science and Public Policy*, vol. 33, 1, pp. 77-83. doi:10.3152/147154306781779154
- [24] Bäcksbäck, F. J. M. (2009). La triple hélice: I+ D+ i en los países nórdicos. La innovación y la implicación empresarial, una asignatura pendiente para España. *Sociedad de la Información y del Conocimiento en los países nórdicos: Semejanzas y divergencias con el caso español*, 115.
- [25] Leydesdorff, L. (2012). The knowledge-based economy and the triple helix model. arXiv:1201.4553.

Os primeiros poboadores da provincia de Ourense: o xacemento paleolítico da Piteira (Toén, Ourense)

E. Méndez-Quintas, R. Lage Socastro, L. Rodríguez Álvarez,
M. A. Álvarez Vázquez e B. Comendador Rey

Departamento de Historia, Arte e Xeografía. Campus de Ourense. Universidade de Vigo
eduardo.mendez.quintas@uvigo.gal, rlagsoc@gmail.com, lucia.rodriguez.alvarez@uvigo.gal,
mianalva@uvigo.gal, beacomendador@uvigo.gal

Resumo

O Paleolítico é unha das etapas que menos interese suscitou entre os investigadores galegos do s. xx. En termos xerais, unicamente se deron investigacións concretas e de escasa continuidade temporal, que redundaron nun coñecemento deficitario e incompleto deste extenso período de tempo. Entre os xacementos máis relevantes estaba o sitio da Piteira (Toén, Ourense). Este enclave escavouse entre os anos 1976 e 1979 baixo a iniciativa de V. Rodríguez Gracia e deparou unha importante colección de ferramentas líticas. Entre estas identificábanse con claridade elementos característicos da tecnoloxía do Paleolítico medio (produtos Levallois e discoides, principalmente) e outros elementos de tradición máis «arcaica». Deste xeito, A Piteira convertíase na única referencia para o noroeste peninsular do Paleolítico medio (e, polo tanto, da presenza de grupos do home de Neandertal), aínda que a discusión sobre a súa adscrición cultural non estaba completamente resolta. A pesar do altísimo interese do sitio, a súa investigación estivo practicamente detida dende as primeiras escavacións. Na actualidade, o noso coñecemento sobre as primeiras etapas da presenza humana no noroeste é máis completa, pero aínda existían importantes lagoas de coñecemento,

como pode ser o caso do xacemento da Piteira. Entre as cuestións que había que resolver, destacaban as caracterizacións do conxunto completo da industria lítica, a interpretación sedimentaria do xacemento ou o establecemento dunha cronoloxía numérica precisa. No transcurso da execución deste proxecto INOU-Campus da Auga 2023 puidemos reactivar a investigación sobre o sitio e obter información valiosa para a súa interpretación, a pesar de constatar a completa destrución do xacemento en datas relativamente recentes.

Palabras clave: Paleolítico medio, plistoceno medio, plistoceno superior, Neandertal e Ourense.

1. Introducción

A investigación das primeiras fases do poboamento humano no noroeste peninsular non tivo un desenvolvemento significativo dentro da tradición investigadora galega [1], a diferenza do acontecido noutras áreas da xeografía peninsular. Nos últimos anos, o desenvolvemento da investigación en áreas xeográficas específicas –como a do Baixo Miño– permitiu aumentar substancialmente o coñecemento sobre esta etapa [2-4]. Actualmente, podemos rastrexar a primeira presenza humana hai uns 500 000 anos de antigüidade con grupos humanos de tecnoloxía acheuliana de tipo africano. Estes grupos perdurarían na rexión ata hai algo menos de 150 000 anos, é dicir unha das mostras máis serodias deste tecnocomplexo a escala europea [5; 6]. Neste último lapso de tempo xa estarían implantados na rexión os primeiros grupos do home de Neandertal, que desenvolvían unha tecnoloxía diferente: o musteriense.

Os datos arqueolóxicos sobre este proceso para o curso medio do río Miño ao seu paso pola provincia de Ourense era e segue sendo deficitario. A pesar de que dende hai décadas se recoñece na zona unha abundante presenza de achados illados de ferramentas líticas de adscripción paleolítica [7-10], a realidade é que pouco ou nada se sabe sobre esta etapa, máis alá da evidente presenza humana nesta época. Entre os poucos sitios recoñecidos en contexto estratigráfico na rexión destaca o da Piteira (Toén), por ser un dos escasos xacementos escavados desta cronoloxía na provincia [11]. Asemade, este xacemento destaca especialmente por conter industria de

características musterienses, propias polo tanto do Paleolítico medio. Na actualidade, A Piteira e o xacemento de Cova Eirós (Lugo) [12] serían os dous únicos sitios deste tipo (en contexto estratigráfico) identificados en Galicia.

A pesar de ser un dos poucos xacementos do noroeste peninsular con industrias de tipo Paleolítico medio, non existían estudos detallados e metodoloxías actuais do conxunto completo de industria lítica. Asemade, tampouco existía información precisa sobre as súas condicións sedimentarias e, sobre todo, non contamos cunha aproximación cronolóxica precisa. Dado o interese deste enclave prehistórico, con este proxecto INOU-Campus da Auga 2023 retomamos a súa investigación con resultados relevantes, pero condicionados polo recoñecemento da destrución do xacemento.

2. O primeiro poboamento humano do noroeste peninsular

Hai algúns anos calquera texto centrado no primeiro poboamento humano de Galicia tería que empezar subliñando a falta de información, a debilidade e o pouco característico do rexistro arqueolóxico, ou mesmo o seu anacronismo en relación co que acontecía noutras rexións do occidente europeo [10; 13; 14]. Afortunadamente, esta xa non é a situación actual, e nos últimos anos o volume de información dispoñible é equiparable á existente no mesmo rango cronolóxico a escala europea ou peninsular. A día de hoxe, o maior volume de información para as épocas máis recuadas no tempo de Galicia proceden da bacía do Miño, especialmente do seu tramo final, é dicir, as comarcas do Condado, da Louriña e do Baixo Miño, e por suposto o Alto Miño portugués [3; 15; 16; 4] (fig. 1).

As favorables condicións xeolóxicas desta zona, que permitiron a conservación de importantes afloramentos de depósitos sedimentarios de terrazas fluviais, facilitaron a preservación dos sitios arqueolóxicos desta época. Agora ben, isto non quere dicir que os grupos humanos estivesen vivindo sempre nos fondos dos vales. Estes grupos eran altamente móbiles e estaban en constante movemento polo territorio. O caso é que para a conservación do rexistro arqueolóxico, os depósitos das terrazas permitiu a súa mellor preservación e, polo tanto, o seu estudo na actualidade.

Os datos actuais indican que o groso da presenza humana durante o Paleolítico antigo (e as etapas tradicionais do Paleolítico inferior e medio) se sitúa aproximadamente entre hai 500 000 e 40 000 anos, asociada preferentemente ás terrazas fluviais [17; 4], aínda que tamén contamos con varios exemplos asociados a covas calcarias [18; 12].

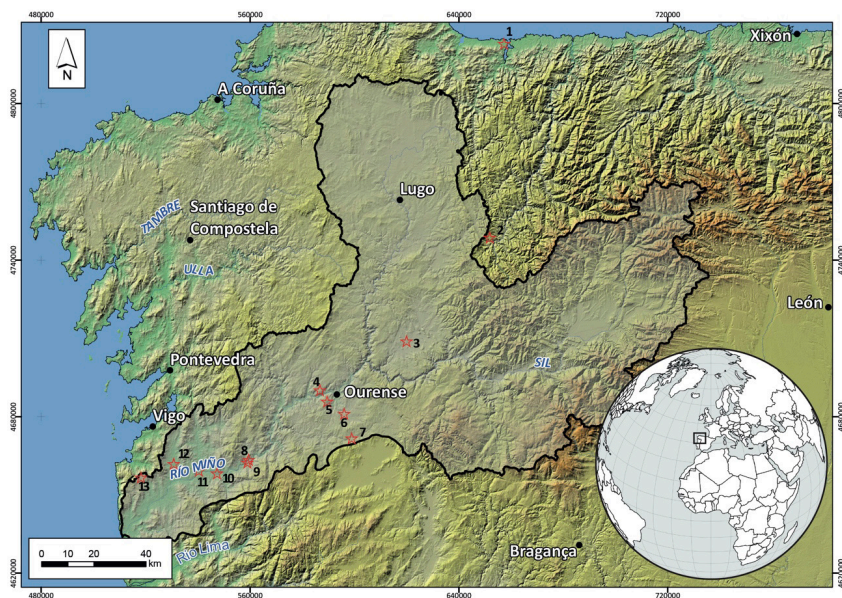


Figura 1. Localización dalgún dos principais xacementos mencionados no texto. 1: Louselas, 2: Valdavara 3, 3: As Lamas, 4: A Chaira, 5: A Piteira, 6: A Regata, 7: sitios nos «chaos» de Amoeiro (Campo da Mama), 8: Arbo, 9: Carvalhas, 10: Porto Maior, 11: Fillaboa, 12: Gándaras de Budiño e 13: Chan do Cereixo

2.1. Os xacementos arqueolóxicos, presuntamente, máis antigos

Na bibliografía hai algunhas referencias a sitios moi antigos, con idades moito anteriores aos 500 000 anos, relacionados coas terrazas fluviais con cotas superiores a +40 metros. As noticias sobre sitios deste tipo xa teñen algúns anos [19; 20], pero recentemente volveuse sobre esta idea [21]. As primeiras referencias [19; 20] sinalan algúns puntos destas características en sitios como Peteira (Tui) e o campo de fútbol de Salvaterra de Miño para a terraza de +76-98 metros; no campo de fútbol de Tomiño e Chan de Vide (As Neves) para a de +56-72 metros; e Oleiros (Salvaterra de Miño) e Chan de Vide (As Neves) na de +42-55 metros. Non temos a posición exacta dos achados nin unha mínima caracterización das estratigrafías ou das supostas ferramentas de pedra.

No caso da publicación máis recente [21], descríbense varios puntos con ferramentas de pedra en terrazas altas. O sitio máis significativo sitúase na parroquia de Vide (As Neves), concretamente no terreo dunha canteira de gravas. Nun corte da estrada de acceso á canteira, concretamente do tramo inferior do perfil visible, a autora identifica oito cantos de cuarcita con extraccións antrópicas [21]. Desgraciadamente, os materiais

en cuestión deixan pouco lugar ás dúbidas sobre a súa orixe natural. Trátanse de seixos con fracturas accidentais ou roturas fortuítas por mor da acción da maquinaria pesada da canteira. Noutros casos (Medáns I e II, Liñares, Porqueira ou A Agrela) sinalados na mesma publicación [21], os materiais arqueolóxicos non se recuperaron en depósitos fluviais, senón en sedimentos superficiais moito máis recentes e sen relación estratigráfica directa cos depósitos das terrazas.

En calquera caso, a información publicada para localizacións desta suposta antigüidade menciona unicamente pezas illadas e pouco diagnósticas sobre a súa factura humana, cuxa procedencia morfoestratigráfica e xeográfica non está ben establecida. A forte inseguridade sobre a posición estratigráfica dos materiais, mesmo as claras dúbidas sobre a natureza antrópica dalgunhas pezas, lévanos a optar por unha posición prudente e soste que non existen, por agora, probas consistentes de presenza humana no noroeste peninsular en cronoloxías anteriores aos 500 000 anos. Evidentemente, non existen causas obxectivas que impidan un poboamento en tales cronoloxías, como sucede noutros puntos da península ibérica ou de Europa, pero neste momento non é posible xustificalo aquí de xeito rotundo.

2.2. A primeira presenza humana segura: o acheuliano

Como dicíamos, a primeira presenza humana ben documentada actualmente asóciase coas secuencias sedimentarias das terrazas de cotas medias (~30 metros) no río Miño e data nuns 500 000 anos, o que é o rexistro ben coñecido máis antigo de Galicia. Os sitios arqueolóxicos identificados son áreas onde se desenvolveron diferentes actividades, pero dos que actualmente só conservamos os restos de artefactos en pedra. O tipo de ferramentas identificadas nestes xacementos coñecémolas como «acheulianas de grandes lascas» e caracterízanse pola fabricación de bifaces e fendedores, sobre grandes seixos e lascas de cuarcita escollidos entre os que achega o río Miño. A presenza de grupos humanos con esta tecnoloxía espállase no tempo uns 400 000 anos ata hai algo máis de 100 000 anos, cando esta tecnoloxía desaparece. Entre os sitios máis importantes desta longa época temos o das Gándaras de Budiño (O Porriño) [22], ata hai pouco o principal sitio do Paleolítico inferior galego, e os recentemente coñecidos sitios de Porto Maior (As Neves) e Arbo (Arbo) [5; 23].

O sitio clásico de Budiño foi descuberto polo xeomorfólogo francés H. Nonn en 1961, no contexto dos traballos de campo da súa tese de doutoramento [24]. O investigador

identificou unha serie de ferramentas líticas de aspecto acheuliano, asociadas a un nivel de areas con gravas nos cortes das explotacións de arxila existentes na zona. Non avisou a J. M. Álvarez Blázquez, por aquel entón comisario local de escavacións de Vigo, quen desenvolvería intensos labores de prospección na zona para recuperar unha importante colección de materiais.

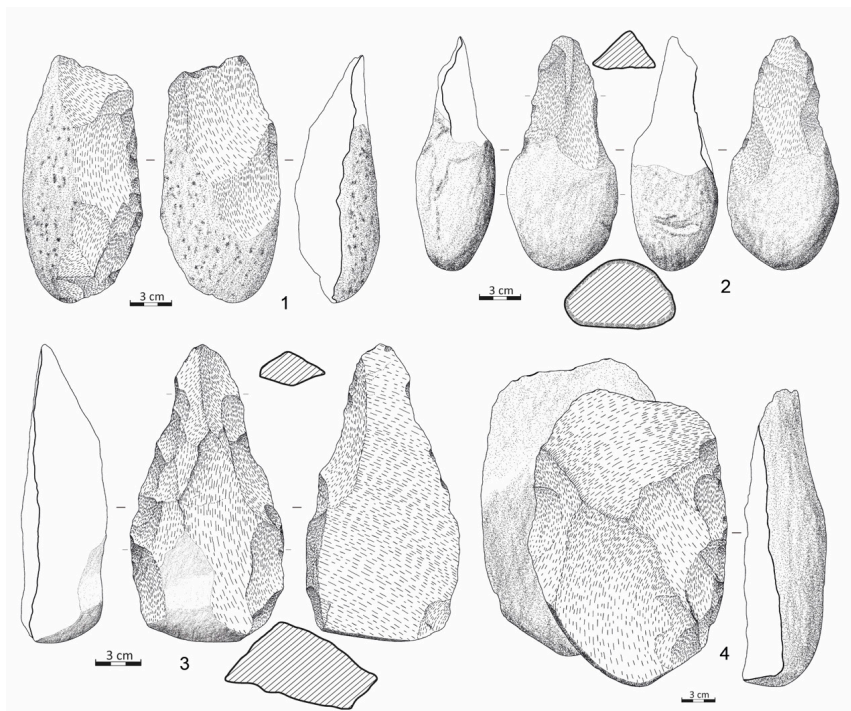


Figura 2. Ferramentas líticas en cuarcita procedentes do sitio das Gándaras de Budiño.
1: biface, 2-3: triedros e 4: fendedor

Ao ter constancia da importancia que presentaba o xacemento, Álvarez Blázquez contactou co paleontólogo E. Aguirre (recentemente falecido) para que fose el quen acometese as investigacións no lugar. Aguirre realizou traballos previos en setembro de 1962 e no verán de 1963, con axuda económica da Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research, emprende a escavación do xacemento. Os resultados dos traballos publicáronse nunha primeira monografía [22], que sería complementada con outros artigos sobre aspectos estratigráficos ou arqueolóxicos [25-27]. As investigacións de campo no xacemento deteríanse e non sería ata o ano 1980 cando J. M. Vidal Encinas retomaríase as investigacións no xacemento entre 1980 e 1982 [28; 29].

Os últimos traballos dos que temos constancia no xacemento efectuáronse a comezos da década de 1990, motivados pola construción da autovía a Portugal e a propia expansión do polígono industrial [30]. Xeomorfoloxicamente, o sitio de Budiño sitúase nunha terraza fluvial duns +30 metros. A súa estratigrafía consiste en niveis de areas grosas e cantos, que inclúen grandes acumulacións de ferramentas líticas acheulianas. Os artefactos están feitos en seixo e en cuarcita, e obsérvase un uso diferenciado destas rochas. O cuarzo utilízase maioritariamente para conseguir lascas, mentres que a cuarcita se seleccionou para a talla dos artefactos complexos, como os utensilios retocados, bifaces, fendedores ou triedros (fig. 2) [31; 32; 29].

Outra das principais referencias para o acheuliano galego témola no xacemento de Porto Maior. Como adoita suceder cos achados de sitios excepcionais, o seu descubrimento foi froito do azar e grazas a M. Ledo Bernárdez. Un azar facilitado por uns traballos de maquinaria, que deixaron á vista un corte no terreo cheo de ferramentas no mes de setembro de 2005 [33]. Tras unha primeira intervención de urxencia e un posterior tapado para protexer o sitio [34], a investigación retomouse en 2012 e continuouse ata 2018 [2; 36]. Desde un punto de vista xeomorfolóxico, o sitio está en relación cos depósitos da terraza de +34 metros sobre o nivel do río e con outra serie de depósitos de xénese posterior. As secuencias estratigráficas observadas na contorna fálannos dunha longa sucesión de máis de 10 metros de espesor, con potentes niveis de gravas e cantos, e á súa vez intercalados ou cubertos por capas de sedimentos máis finos. No afloramento principal do xacemento individualizáronse cinco paquetes sedimentarios principais nomeados (do máis vello ao máis novo) como PM1 a PM5. A obtención de datacións numéricas en Porto Maior supuxeron un fito na historia da investigación do Paleolítico galego, xa que foi a primeira vez que se puido datar con precisión un sitio desta antigüidade. Os resultados combinados dos dous métodos de datación estableceron un marco cronolóxico moi sólido para o xacemento. Deste xeito, os niveis inferiores PM1-2 depositáronse hai uns 312 550 anos, o PM3 hai 258 300 anos, o PM4 cara aos 210 650 anos e finalmente o nivel PM5 depositouse hai uns 18 800 anos [2; 36] (fig. 15).

De todos os niveis escavados no xacemento destaca o nivel PM4, no que se documentou unha densa acumulación de pezas líticas, na súa inmensa maioría bifaces, aínda que tamén temos bos exemplos de triedros e fendedores (fig. 3). A presenza case exclusiva de pezas configuradas é de inicio anómala, xa que o normal sería que

estivesen os restos da súa fabricación, o que nos levaría a ter centos, pero os datos que temos descartan que estas acumulacións sexan o resultado de arrastres sedimentarios ou outros procesos naturais. Estamos, pois, ante un comportamento humano deliberado, preservado no tempo por máis de 200 000 anos. Deste xeito, o nivel PM4 de Porto Maior representa actualmente o único xacemento caracterizado por densas e case exclusivas acumulacións de bifaces documentado a escala europea.

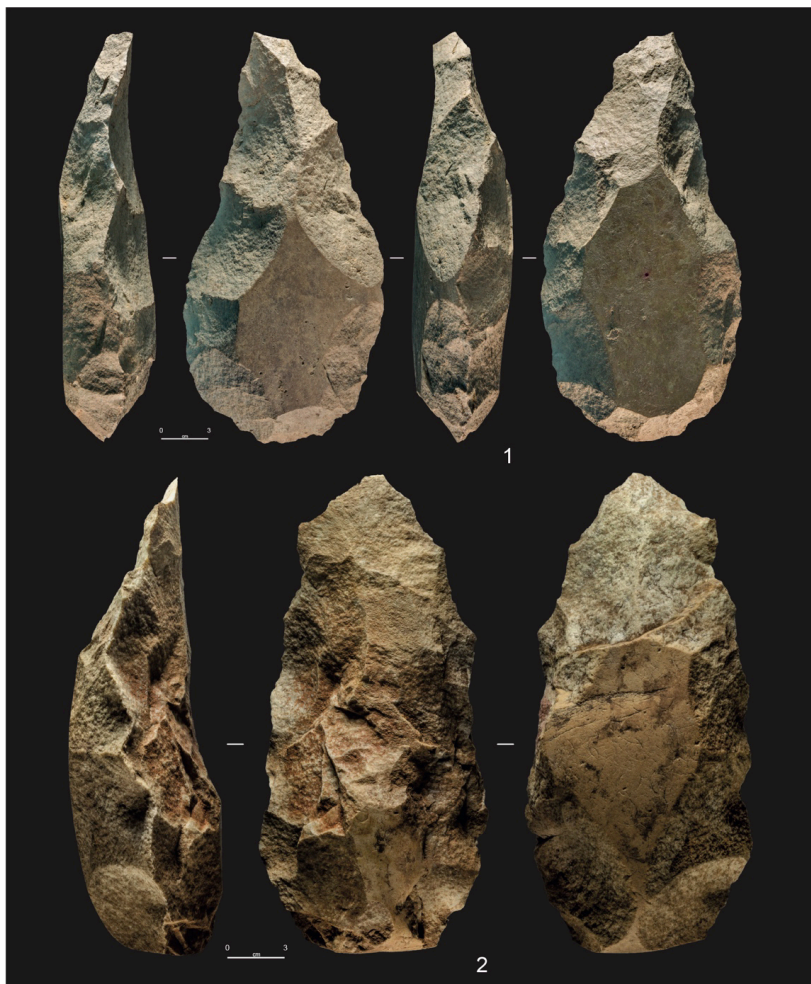


Figura 3. Bifaces procedentes da acumulación de ferramentas do nivel PM4 de Porto Maior

Por último, aínda que non menos importante, está o xacemento de Arbo [37; 5; 23] . Identificado inicialmente por M. Ledo Bernárdez e J. C. Amil Baltasar tras os

traballos de plantación dunha viña, o espazo investigado do xacemento sitúase na finca «O Cabrón» en Arbo. Estamos nun pequeno val colgado e erosionado sobre unha superficie fluvial a +62 metros sobre o fondo do val do Miño. A secuencia sedimentaria identificada presenta dous ciclos de depósitos tipo «debris flow»,¹ que conteñen o rexistro arqueolóxico. A idade de luminescencia para o nivel máis recente achega unha data duns 118 000 anos, que á súa vez proporciona unha estimación mínima da cronoloxía inicial do sitio. Por tanto, a presenza humana no sitio sería algo máis antiga a esa data. As ferramentas recuperadas, por miles para a pequena superficie escavada no sitio, mostran características tipicamente acheulianas de grandes lascas, feitas preferentemente sobre cuarcitas e cuarzos. Deste sitio destacan os seus bifaces ou fendedores polas súas formas regulares e talla moi coidada (fig. 4).

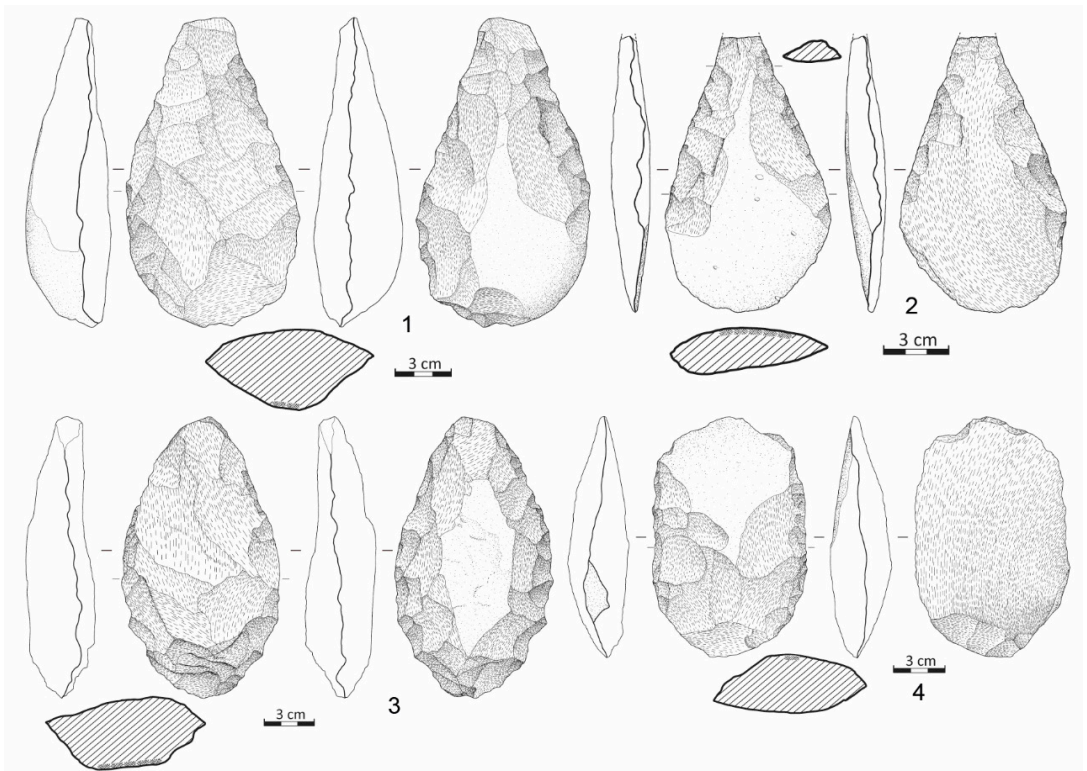


Figura 4. Bifaces (1-3) e fendedor (4) en cuarcita do de Arbo

1 Este tipo de depósitos fórmanse nas zonas de ladeira e caracterízanse polo seu aspecto caótico e sen organización interna.

2.3. O fin dos grupos acheulianos e a irrupción dos neandertais

Seguindo os datos dispoñibles actualmente cara aos 120 000 anos, os grupos de tecnoloxía acheuliana desaparecen e os grupos que habitaban a rexión xa eran neandertais. Neste senso, a cronoloxía que sinalamos para o sitio de Arbo parece marcar o fin, ou mellor dito, a extinción dos grupos humanos que fabricaban os bifaces e os fendedores. Este dato é moi importante, xa que sinala un dos exemplos máis serodios en toda Europa para este proceso [5; 38] .

Á marxe das referencias da Piteira e de Cova Eirós, son moi poucos os testemuños seguros de sitios con características tecnolóxicas estritamente musterienses. Unicamente, existen algunhas noticias imprecisas de materiais líticos na zona de Forcadela e Carregal Baixo (Tomiño) [39] . Os materiais de Carregal Baixo interpretáronse como ferramentas de tipo Paleolítico medio. A este sitio habería que engadir o da Barreira (Cortegada), tamén con ferramentas líticas semellantes [39] .

2.4. O rexistro na cunca media do río Miño no contorno da provincia de Ourense

Aínda que cun volume de información máis reducido, a cunca media do río Miño ao seu paso pola provincia de Ourense tamén ten un rexistro arqueolóxico relevante para esta época. Agora ben, a diferenza do rexistro coñecido na cunca baixa do Miño, aquí temos unha información contextual e cronolóxica moito menos «rica».

Entre os xacementos máis significativos atópase o xacemento da Regata na poboación de San Cibrao das Viñas [40] . Afectado pola construción do polígono industrial, no ano 1976 desenvolveuse unha actuación de urxencia de extensión limitada a cargo de J. Sierra Rodríguez e V. Rodríguez Gracia cuxos resultados se deron a coñecer nunha pequena nota sobre a xeoloxía do xacemento, que non achega información moi precisa [41] .



Figura 5. Fendedores (1-4) e bifaces (5-6) en cuarcita do xacemento da Regata

A industria recuperada, unhas 246 pezas, mostra sinais evidentes de rodamiento, polo que deberon experimentar algún tipo de transporte fluvial. A industria ten como materia prima principal a cuarcita, aínda que se observan outros tipos de cuarzo e algunhas calcedonias. Recoñécese un reducido número de lascas e de núcleos pouco complexos. O conxunto está composto na súa maior parte por grandes retocados de tipo acheuliano e destaca unha excelente e abundante mostra de fendedores. Trátase dunha das coleccións máis completas e variadas deste tipo de artefactos, entre os coñecidos en todo o noroeste peninsular (fig. 5). Na súa maior parte mostran coidados retoques, o que lles confire un característico aspecto simétrico, esporadicamente conseguidos mediante o uso do percusor brando. Bifaces e triedros mostran en

conxunto unha representación menor, aínda que con exemplares característicos, moitos dos cales presentan un grao de configuración elevado (fig. 5).

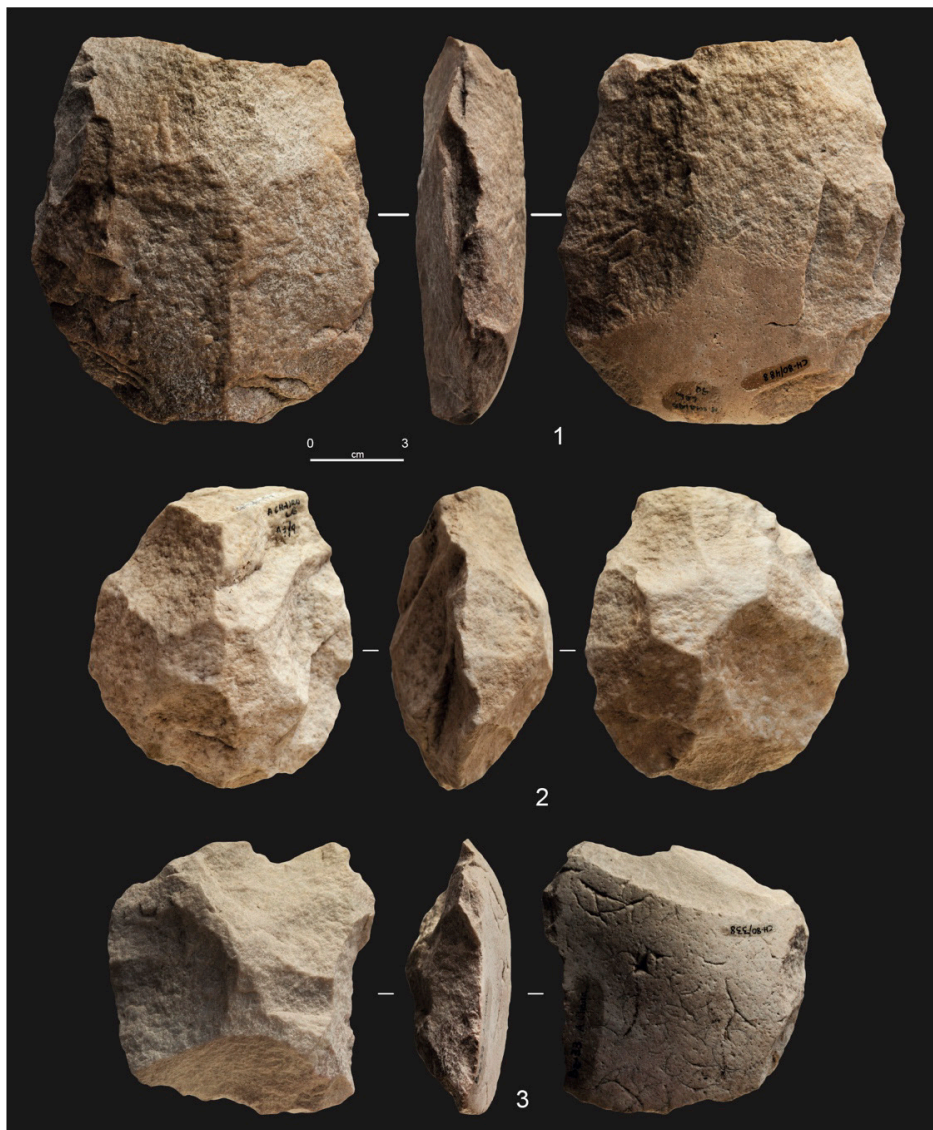


Figura 6. Exemplo de industria lítica en cuarcita do xacemento da Chaira
1: base de biface lanceolado; 2-3: núcleos de lascas de carácter centrípeto

Fóra do dominio estritamente fluvial do val do río Miño, nos «chaos», a máis de 500 metros de altitude que rodean o val, atopamos outra referencia clásica na bibliografía

sobre o primeiro poboamento humano da rexión: A Chaira (San Amaro). O xacemento da Chaira, en San Cibrao de Las, sitúase na planicie que se estende ao norte do río Miño a uns 500 metros de altitude, a escasos metros do coñecido asentamento galaico-romano. Escavado de urxencia, dada a construción dun campo de fútbol, por membros do Grupo Marcelo Macía e o Museo Arqueolóxico de Ourense, recuperouse unha inxente cantidade de industria, das que se describiron unhas 500 pezas [42], aínda que o número real é bastante superior. Estratigraficamente a industria aparece contida nun nivel detrítico, case sen matriz, que integra nunha secuencia edáfica holocena. Estamos perante materiais alóctonos, é dicir, completamente redepositados e reciclados de niveis máis antigos e cunha dilatada historia tafonómica. Entre os materiais identifícanse certos elementos de características acheulianas, como bifaces ou fendedores (fig. 6), e outros de cronoloxías netamente posteriores. Unhas conclusións semellantes pódense facer extensivas a outros conxuntos líticos de aspecto heteroxéneo recuperado en contextos estratigráficos semellantes na mesma zona [43].

Nas proximidades da capital ourensá, outra rexión de interese para coñecer a primeira presenza humana é a definida entre os concellos de Ourense, Toén, Barbadás, San Cibrao das Viñas, Taboadela e Allariz. Nesta zona tense noticia da existencia de importantes localizacións de materiais líticos en superficie de características acheulianas e musterienses (Monxardín). Esta abundancia de rexistro arqueolóxico ratificouna a construción dun novo tramo da autovía das Rías Baixas no ano 1996. Estes traballos permitiron recuperar abondoso material lítico tallado realizado en materias primas locais (cuarzo e, en menor medida, cuarcita) en xacementos como A Veiga, Campo da Mama, Queiroas e, máis cara ao suroeste, nos depósitos fluviais do río Arnoia [44; 45]. Identifícanse algúns morfotipos claramente acheulianos, aínda que na maior parte dos casos estamos ante núcleos e lascas, entre as que se observan estratexias de produción de tipo discoide e Levallois, os máis característicos do mundo do Paleolítico medio.

2.4.1. A depresión de Monforte de Lemos

Aínda que administrativamente está fóra da actual provincia de Ourense, xeograficamente están estreitamente relacionadas. O curso medio do río Miño está marcado polo forte encaixamento do seu leito. Unicamente no interior de accidentes

tectónicos importantes (caso das fosas tectónicas) algúns afluentes do Miño puideron desenvolver amplos vales e, á súa vez, sistemas de terrazas fluviais, como é o caso da cunca de Monforte e o río Cabe. Os recentes traballos de prospección, escavación e interpretación xeomorfolóxica permitiron identificar relevantes concentracións de ferramentas líticas paleolíticas, aínda que na súa maioría sen conexión estratigráfica [46; 47] . Entre os sitios identificados destacan Chan do Fabeiro, A Gándara e, especialmente, As Lamas. Neste último xacemento desenvolveuse unha campaña de sondaxe e púidose recoñecer a relación estratigráfica da industria acheuliana e outro Paleolítico Medio datado en ~39000 anos [48] .

Nos relevos inmediatos a esta depresión, concretamente nas abas da serra do Courel, onde as condicións litolóxicas permiten a existencia de calcarias e o desenvolvemento de sistemas cársticos, coñécense xacementos con rexistro de tipo Paleolítico medio e restos de fauna como Valdavara 3 (Becerreá) [18] ou a xa mencionada Cova Eirós (Triacastela) [12] .

3. O xacemento da Piteira

Como xa indicamos, o xacemento da Piteira é un dos xacementos paleolíticos máis coñecidos de todo o noroeste peninsular, xa que ata tempo ben recente era un dos poucos escavados. Asemade, tamén contaba coa particularidade de ser unha das poucas referencias á presenza de grupos humanos con tecnoloxía do Paleolítico medio sobre o mesmo ámbito xeográfico.

O xacemento da Piteira (X: 587974,193; Y: 4684046,372, ETRS 89 H30) atópase a unha cota de 482 metros e administrativamente enclávase en terreos da Asociación de Montes Moreiras-Trelle², na parroquia de San Pedro de Moreiras, concello de Toén (fig. 7).

2 Agradecemoslles a axuda e a colaboración prestada aos membros da Asociación de Montes de Moreiras-Trelle e da asociación Amigos do Patrimonio de Toén, nas persoas de Pablo Sabucedo, David Sabucedo e Antón Gil.



Figura 7. Localización xeral e detalle sobre ortoimaxe aérea do xacemento da Piteira

3.1. Descubrimento e historia das investigacións

Vicente Rodríguez Gracia identifica o xacemento da Piteira o 28 de setembro de 1973 tras a recuperación de 35 pezas líticas, algunhas delas en posición estratigráfica, nunha antiga explotación de saprólita afectada por escoamentos superficiais. Dado o interese do descubrimento, este foi posto en coñecemento do Departamento de Prehistoria da Universidade de Santiago de Compostela. Baixo a dirección de Rodríguez Gracia, así como C. Alonso del Real e J. M. Vázquez Varela, desenvólvense dúas campañas de traballo en 1974 (meses de abril e de setembro) e outra en 1974 [11].

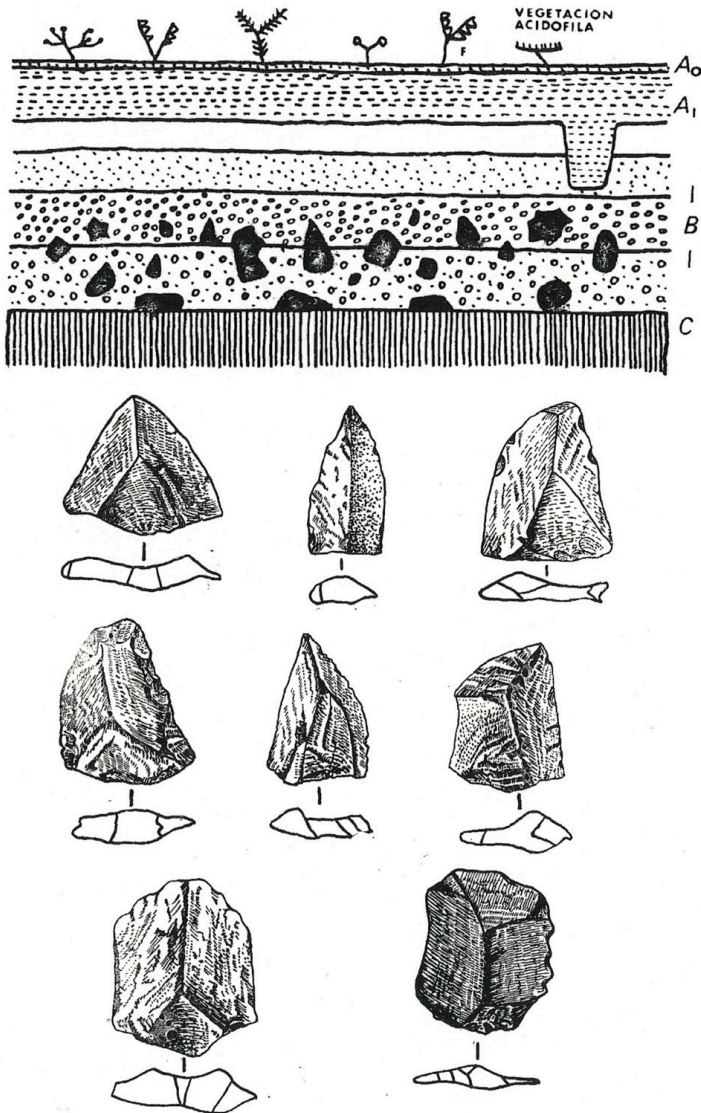


Figura 8. Estratigrafía do xacemento e exemplo de ferramentas líticas publicadas inicialmente por Rodríguez Gracia en 1976 [11]

A publicación inicial destes traballos manifesta o interese do sitio, no que se identifican ao redor de 3000 pezas líticas nunha superficie de escavación non moi grande. Os materiais aparecen contidos nun único nivel detritico matriz soportado, que asenta directamente sobre o substrato granodiorítico local [11]. As primeiras

aproximacións á industria lítica recollida por Rodríguez Gracia [11] destacan a presenza de elementos característicos da tecnoloxía musterienses, como lascas ou núcleos Levallois (fig. 8), tallados sobre cuarcitas alóctonas, seixo local e unha variedade particular de rocha «microcristalina» semellante ao sílex. Na mesma publicación tamén se sinala a existencia de artefactos líticos «arcaicos», como bifaces ou fendedores, para concluír que o xacemento é «un taller, con una industria musteroide, de facies levalloisiense, en la que se mezclan elementos arcaicos y relativamente modernos» [11].

A investigación sobre o xacemento detense con posterioridade á citada publicación e unicamente aparecerá como unha referencia en traballos de síntese. Os traballos de investigación de campo retómanse no ano 1996 da man de R. Villar Quinteiro que, coa colaboración de A. Martínez Cortizas, revisan a estratigrafía da zona escavada anteriormente [49]. Os resultados desta actuación describen unha secuencia de máis de 2 metros de espesor sobre a rocha granodiorítica local. Na base da secuencia (nivel ii) identifícase un paquete duns 65-70 centímetros de espesor de areas e gravas graníticas e de seixo matriz soportadas, que amosa o desenvolvemento dun proceso edáfico coa presenza dunha secuencia de horizontes A-Bw-C (Cambisol húmico). Este nivel é o único que contén material arqueolóxico, que se concentra na base do paquete. Truncando esta secuencia, identifícase un paquete areoso discontinuo de 10-15 centímetros (nivel iii), que erosiona a capa inferior. Finalmente, sobre este identifican un nivel heteroxéneo pero con estruturas fluviais netas (nivel iv) [49].

Na mesma publicación onde se describe a estratigrafía do xacemento, faise tamén o estudo do conxunto de material conservado no Museo Arqueolóxico de Ourense (unhas 1000 pezas), nas que de novo se sinala a existencia de elementos tecnoloxicamente musterienses «mesturados» con outros artefactos máis «arcaicos» de tradición acheuliana. Isto leva a autora a optar por incluír o xacemento dentro do grupo do «Musteriense de tradición acheuliana» [49].

Finalmente, no ano 2005 vólvese sobre o estudo da industria lítica, pero neste caso sobre unha porción da colección (388 pezas) procedente da escavación de 1974, que estaba conservada nos almacéns da Facultade de Historia da Universidade de Santiago de Compostela. De novo, o estudo tende a relacionar o groso dos materiais analizados coa esfera tecnolóxica musteriense, aínda que eventualmente identifica elementos rodados anteriores de tipo acheuliano [50].

4. Resultados do proxecto

O proxecto «PaleoOurense I (PALEOU_I). Os primeiros poboadores da provincia de Ourense: o xacemento paleolítico da Piteira (Toén, Ourense)» tiña como obxectivo xeral retomar a investigación da primeira presenza humana no curso medio do río Miño, ao seu paso pola provincia de Ourense, concretamente coa revisión dun dos poucos xacementos e posición estratigráfica coñecidos na rexión: A Piteira. Os obxectivos previstos eran recoñecer as características do rexistro arqueolóxico, condicións de formación e paleoambiente do xacemento mediante a súa reescavación; obter un marco cronolóxico sólido; e analizar o conxunto arqueolóxico xa existente, e o recuperado durante os novos traballos, seguindo criterios tecnomorfolóxicos, tecnoeconómicos (incluíndo a caracterización de materias primas) e tecnofuncionais. A investigación na Piteira permitiría, polo tanto, avanzar no desenvolvemento dunha liña de investigación sistemática sobre o Paleolítico rexional, que amosa profundas eivas de coñecemento con respecto a outras épocas da prehistoria ou da protohistoria.

Seguindo estes obxectivos, o proxecto necesitaba realizar unha fase de traballo de campo no xacemento e o estudo da colección histórica conservada no Museo Arqueolóxico de Ourense para completar a análise global do xacemento.

4.1. A actuación sobre o xacemento: resultados

Os traballos de campo comprenderon o recoñecemento e a prospección da contorna do xacemento, así como o desenvolvemento de sondaxes arqueolóxicas sobre a zona previamente escavada. Sufrimos problemas para localizar a posición concreta das escavacións históricas. Na documentación consultada nas diferentes administracións existían discrepancias significativas sobre a localización xeográfica do sitio. A situación precisa do lugar era un aspecto importante, tanto para cumprir os obxectivos previstos coma para a propia tramitación administrativa da autorización de actuación arqueolóxica. Finalmente, púidose verificar a posición concreta do xacemento, tras varias visitas á zona, en terreos da Comunidade de Montes de Moreiras-Trelle (Toén). A Dirección Xeral de Patrimonio Cultural, tras a presentación do proxecto de actuación arqueolóxica e a autorización dos propietarios, autoriza a actuación o 20/10/2023 (Código SXPA: CT 102A 2023/904-0). Os traballos de campo non se puideron desenvolver a causa das adversas condicións climáticas ata comezos de decembro, concretamente entre os días 7 e 13 deste mes.

O recoñecemento previo do xacemento, así como as informacións facilitadas por membros da asociación Amigos do Patrimonio de Toén, permitiu observar que a zona sufrira diferentes alteracións por traballos extractivos de saprólita, canteira, recheos..., pero, en principio, non parecía que o xacemento estivese completamente esgotado. Unha vez sobre o terreo, tras o recoñecemento detallado do lugar e a realización das sondaxes arqueolóxicas, verificouse que xa non quedaban sedimentos orixinais do xacemento. Polo tanto, os traballos de campo certificaron a destrución completa do xacemento a causa da actividade humana recente (fig. 9).

Na sondaxe 1 unicamente se puideron identificar áreas primarias da meteorización das granodioritas locais (fig. 9). Na sondaxe 2, sobre o bordo da canteira, unicamente restaban capas de sedimentos remexidos no contexto da súa explotación (fig. 9). Na contorna non alterada unicamente se observan afloramentos da rocha base, moi afectados pola actividade da canteira moderna. A análise do histórico de fotografía aérea do Instituto Xeográfico Nacional (IGN) permitiu identificar as datas aproximadas nas que o xacemento acaba sendo destruído, grosso modo entre os anos 1998-2007 (fig. 10).



Figura 9. Vista actual da localización do xacemento, onde se observa como a zona está completamente dismantelada e o aspecto das sondaxes desenvoltas con resultados negativos

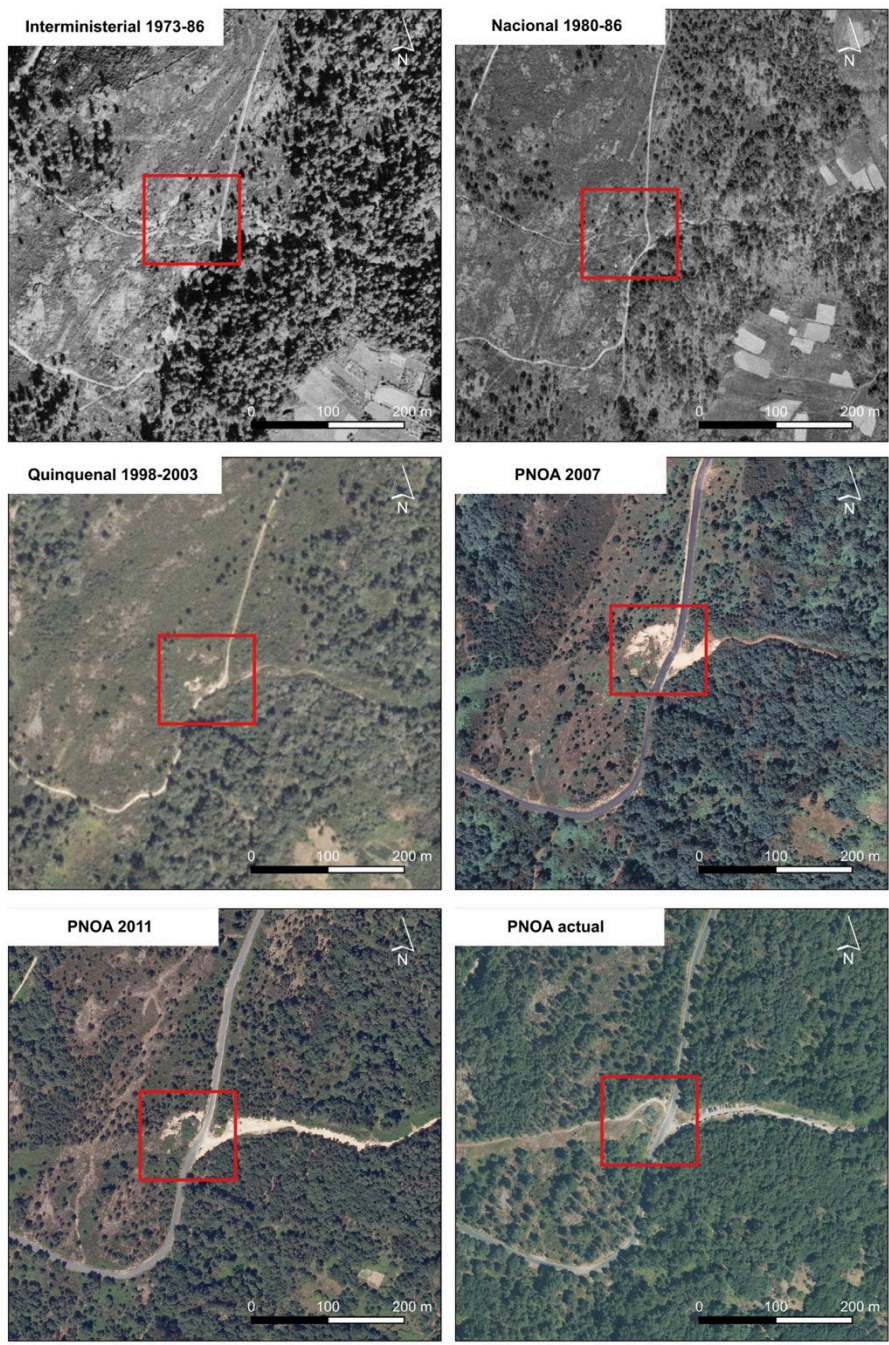


Figura 10. Histórico de fotografía aérea do xacemento, onde se pode observar como entre 1998-2003 e 2007 o xacemento acaba sendo destruído

Neste senso, a inexistencia de depósitos orixinais no xacemento impediu afondar en aspectos como os sedimentarios, paleoambientais e cronolóxicos. En todo caso, o recoñecemento da zona permite encadrar xeomorfoloxicamente o xacemento na cabeceira dun pequeno regato que drena as súas augas á bacía do río Barbaña. Con respecto a isto, así como seguindo as informacións publicadas dispoñibles, todo parece indicar que os depósitos que contiñan os materiais arqueolóxicos están relacionados co funcionamento deste pequeno curso fluvial. A natureza deste tipo de depósitos, así como a propia topografía do terreo, descarta que os materiais arqueolóxicos sufrisen importantes alteracións posdeposicionais. En todo caso, estes datos non permiten establecer ningunha relación cronolóxica, pero explica a presenza do xacemento nun contorno ambiental moi favorable para os grupos humanos do Paleolítico, sobre todo pola presenza de abundante auga doce.

4.2. A caracterización do conxunto de industria lítica das escavacións históricas

A colección de industria lítica recuperada durante os traballos dos anos setenta no xacemento está actualmente integramente depositada no Museo Arqueolóxico Provincial de Ourense. Inicialmente esta estaba «segregada» en dúas subcoleccións diferentes: a do Museo de Ourense e a conservada na Facultade de Historia da universidade compostelá.

No conxunto inicial conservado no museo e adscrito teoricamente ao xacemento, identificouse unha gran cantidade de pezas de orixe indeterminada (moitas de procedencia superficial), sen sigla ou referencia de ningún tipo, e incluso procedente doutros puntos da península ibérica. Asemade, entre os materiais claramente procedentes da Piteira, existe un abundante conxunto de pezas que non amosan sinais de manipulación antrópica. A revisión completa de toda a colección permite contabilizar un total de 2556 pezas procedentes da zona do xacemento da Piteira, aínda que non todas foron recuperadas en estratigrafía durante as escavacións. Do conxunto inicial de 2556 artefactos, desbotáronse 229 elementos por non presentar sinais claros de manipulación antrópica ou por non ter garantías da súa procedencia (ausencia de sigla, evidencias de exposición superficial prolongada...). O conxunto finalmente analizado foi de 2327 artefactos líticos.

Os materiais analizáronse seguindo as metodoloxías habituais no estudo de coleccións de industria lítica paleolítica. As pezas foron medidas e pesadas, e as súas

características técnicas integráronse nunha base de datos específica, que permite a súa xestión estatística. Asemade, as pezas máis informativas fotografáronse e escaneáronse en 3D. As materias primas determináronse desde un punto de vista macroscópico, cunha primeira caracterización de visu do material, seguido dunha análise das mostras cunha lupa dixital portátil para a identificación máis precisa.

4.2.1. Aspectos xerais do conxunto

O conxunto analizado (2327 pezas) caracterízase por unha alta proporción de elementos asociados á actividade de talla, como lascas de mediano e pequeno tamaño (62,6 %, en conxunto), desfeitos de talla (24,0 %), núcleos (4,4 %) ou percusores (0,9 %). A presenza de pezas retocadas é significativa (5,7 %), mentres que a representación de macroutensilios ou grandes lascas é moi reducida (0,2 % e 0,6 %, respectivamente) (táboa 1).

Taboa 1. Principais categorías tecnolóxicas identificadas no estudo da colección lítica

Categoría tecnolóxica	n	%
Percusores	21	0,9
Lascas pequenas (< 30 mm)	271	11,9
Lascas medianas (30-100 mm)	1152	50,7
Grandes lascas (> 100 mm)	14	0,6
Núcleos	99	4,4
Retocados sobre canto	19	0,8
Utensilios sobre lasca	110	4,8
Fragmentos de retocado sobre lasca	1	0,0
Lacas de reavivado de utensilio	5	0,2
Fendedores	1	0,0
Bifaces	2	0,1
Grandes retocados sobre lasca	24	1,1
Triedros	1	0,0
Fragmentos de gran retocado	8	0,4
Desfeitos de talla	545	24,0
	2273	

As materias primas empregadas agrúpanse en tres grandes grupos: cuarcitas, seixo e rochas silíceas de gran fino (sílex hidrotermal, principalmente), que representan respectivamente o 69,9 %; o 27,7 % e o 1,5 %. O restante 0,7 % son materias primas

indeterminadas. A maior parte destas rochas (agás as variantes filonianas de seixo) son esóxenas, polo que tiñan que ser introducidas dende o exterior do xacemento. Concretamente, a cuarcita aparece nas beiras do río Miño, a máis de tres quilómetros de distancia do xacemento. Actualmente, con este estudo de carácter preliminar descoñecemos con precisión a procedencia dos sílex identificados.

O sílex hidrotermal non presenta elementos definitorios claros, pero aparece asociado a procesos tectónicos a partir de procesos hidrotermais con alto contido en sílice, polo que é compatible coa base xeolóxica e, polo tanto, podería aparecer nun ámbito local [51] (fig. 11). As pezas estudadas presentan roca caixa; polo tanto, a captación é directa. Non obstante, en menor medida, dende o aspecto cuantitativo aparecen mostras con neocórtex fluvial, o que nos falaría destas formacións tras procesos de erosión fluvial e a súa posterior captación nun ambiente secundario. Porén, non foi posible concretar a súa orixe debido á ausencia de mostras compatibles ata o momento. Finalmente, tamén se identificou unha variedade de chert (lidita) (fig. 11). Esta é un tipo de rocha silíceica que aflora durante o paleozoico (fundamentalmente no silúrico) e que foi identificada en traballos anteriores [52] .

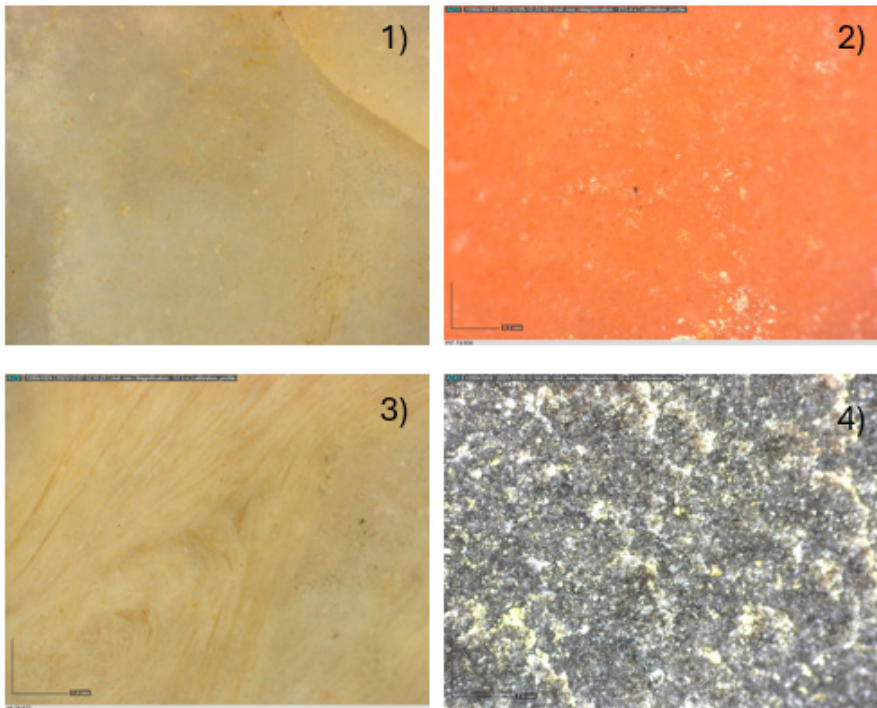


Figura 11. Exemplos de microfotografías de sílex hidrotermal (1-2-3) e lidita (4)

Os materiais amosan de xeito xeneralizado abrasión superficial que, en moitos casos, dificulta a súa lectura. Igualmente, moitas pezas teñen alteracións superficiais compatibles con alteracións térmicas pola exposición ao lume. Esporadicamente tamén se constataron (46 casos) sinais claros de eolización. Con respecto ao tamaño e ao peso, observamos importantes diferenzas entre os artefactos tallados nos grupos de materias primas máis abundantes (cuarcita e seixo), con valores de medios métricos de 60,2 x 53,7 x 20,8 mm e 37,7 x 36,0 x 16,9 mm; e pesos de 109,1 g e 31,2 g, respectivamente.

4.2.2 Percusores

Identificáronse 21 percusores (0,9 %), todos eles en cuarcita agás un en cuarzo. Con todo, evidéncianse marcas de percusión noutros 23 elementos: 13 núcleos, 3 cantos tallados e diversos utensilios ou lascas corticais (7 casos). Nótase certa variabilidade en canto ao peso (rango 127-8-9 g), ao ser máis homoxéneos no tamaño, cuxa media é de 85,4 x 73,6 x 46,6 mm. As marcas adoitan situarse no extremo dos artefactos e afectan, en xeral, a unha superficie reducida das pezas (xeralmente < 25 % da superficie do obxecto).

4.2.3. Lascas de pequeno e mediano formato

Esta constitúe a categoría máis representada do conxunto (62,6 %). Numericamente destacan as de tamaño medio (50,7 %) fronte ás pequenas <30 mm (11,9 %). En canto ás materias primas, estas teñen preferentemente a cuarcita como soporte (67,9 %) fronte ao cuarzo (29,5 %) ou a outro tipo de rochas (2,6 %). Como elementos máis significativos, cabe mencionar un número elevado de lascas procedentes de núcleos con sistemas de explotación moi organizados, de tipo discoide (5,1 %) ou Levallois (2,0 %) (fig. 12).

O grao de corticalidade das caras dorsais resulta equilibrada. Destaca a alta proporción de lascas de totalmente corticais (11,2 %) ou con amplos restos dela (40,1 %), e o 48,7 % restante é soporte sen cortiza. Esta proporción indica que o inicio da maior parte dos núcleos se fixo no propio xacemento, polo que se pode falar de cadeas operativas esencialmente completas.

Os valores medios de tamaño das lascas é de 44,1 x 43,9 x 16,9 mm e 43,6 g. Isto establece unha relación claramente cuadrangular con valores de 48,5 x 47,9 mm na cuarcita, e 36,4 x 35,4 mm para o cuarzo.

4.2.4. Os núcleos

Identificáronse 99 elementos (4,4 %) no conxunto que segue esta clasificación tecnolóxica. A cuarcita é a rocha máis empregada (75,8 %), mentres o seixo ou o sílex teñen un papel secundario (24,2 %). En canto á matriz inicial destes núcleos, non se puido determinar en 77 casos polo alto índice de aproveitamento que presentan, mentres que 14 están elaborados sobre lasca e oito sobre canto.

As estratexias de explotación empregadas mostran un predominio das solucións monopolares (38,1 %), seguidos de solucións periféricas (18,1 %) ou ortogonais (10,6 %). É especialmente significativa a presenza de núcleos reducidos mediante estratexias complexas como as centrípetas/discoides ou Levallois (preferentemente nas súas variedades recorrentes), que alcanzan o 26,6 % dos núcleos identificados (16,0 % e 10,6 %, respectivamente) (fig. 12).

O grao de aproveitamento xeral é elevado e o 40,4 % dos casos mostra unha estado moi avanzado ou definitivamente esgotado. En cambio, só un 15,9 % amosa un estado incipiente de explotación e o 43,6 % restante retén un volume suficiente como para seguir producindo lascas.

Con todo, o maior grao de aproveitamento (82,30 %) evidénciase nas estratexias centrípetas bifaciais, cunha media de 11,8 negativos respecto aos valores xerais de 6,8 negativos por núcleo. Os valores dimensionais das pezas en cuarcita (132,8 x 75,2 x 44,8 mm; 418,4 g) é substancialmente maior ca as de seixo (56,4 x 48,8 x 39,4 mm; 135,05 g). Isto tamén ten a súa correlación no tamaño dos negativos completos observados nas súas superficies, con valores de 39,0 x 29,5 mm na cuarcita e 17,5 x 14,6 mm no seixo.

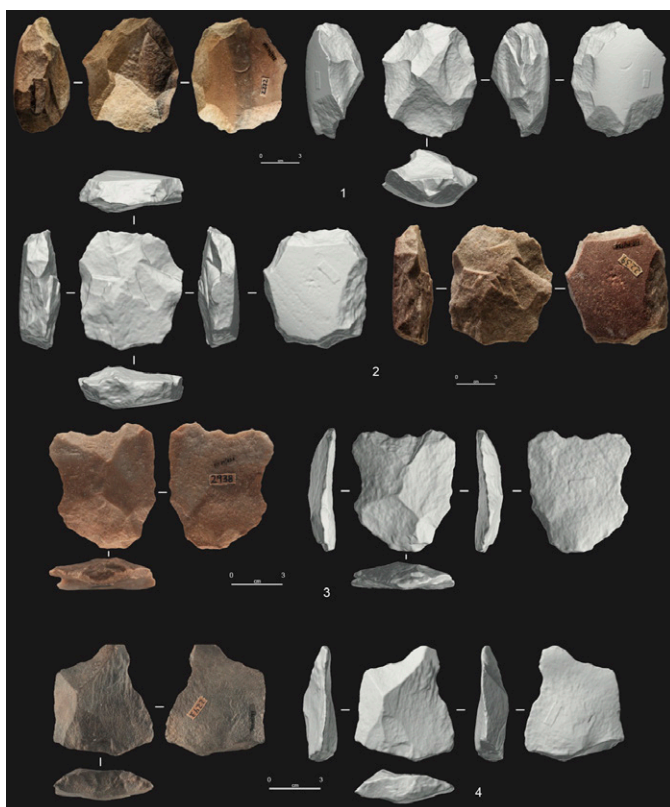


Figura 12. Exemplos de ferramentas líticas (fotografía e modelo 3D) do xacemento da Piteira: núcleos discoide (1), Levallois (2) e lascas Levallois (3-4)

4.2.5. Utensilios retocados de pequeno e mediano formato

Trátase dun conxunto relevante do 6,7% da colección, onde predominan os artefactos retocados sobre soportes de cuarcita (74,1 %) fronte aos de seixo (2,8 %). En termos xerais, o tipo de artefacto máis repetido son os raspadores (53,7 %), seguidos dos denticulados (15,7 %) e os entalles (5,8 %). Chama a atención a selección reiterada de soportes en seixo para a confección de perforadores, esencialmente atípicos, que supón o 70,0 % dos retocados en seixo. Tamén cómpre sinalar a identificación de 19 utensilios sobre canto, no que destacan 16 exemplos de tipo canto traballado de fío simple.

Os raspadores mostran certa variedade tipolóxica, aínda que sobresaen os simples de forma convexa (56,1 %) e recta (15,1 %). Amosan certo grao de transformación do soporte inicial, como así o indica o número medio de retoques por peza (media de 7,4 negativos). Así mesmo, observamos un patrón semellante entre os denticulados, que definen preferentemente morfoloxías convexas (42,1 %) ou rectas (52,6 %). Como os raspadores, o grao de transformación das pezas é significativo, cunha media de 5,9 negativos por peza. No conxunto, o retoque xeneralizado é o simple, de tipo directo ou inverso e extensión marxinal. Estes artefactos amosan un tamaño medio de 84,7 x 69,7 x 25,9 mm e 182,5 g, que é substancialmente máis grande ca o das lascas non retocadas. Tendo en conta os principais tipos de materias primas, a pezas en cuarcita son máis grandes ca as de cuarzo (97,5 x 80,5 x 28,7 mm e 227,79 g; 42,5 x 32,6 x 16,7 mm e 30,8 g, respectivamente).

4.2.6. Grandes retocados sobre lasca

A súa presenza na serie é certamente escasa (1,1 %), para o que se seleccionaron preferentemente lascas corticais en cuarcita. Identificamos a presenza minoritaria dalgúns elementos entre os que cabe destacar tres coitelos con dorso e dous macrodenticulados, pero o conxunto está dominado polos raspadores masivos (50 %) e destacan novamente os de tipo convexo (36,8 %). Neste tipo de retocados, o número medio de extraccións é de 8,41. As dimensións medias son de 235,6 x 167,7 x 39,9 mm; 572,3 g. O fendedor identificado ten como soporte unhas lascas de cuarcita con restos corticais, ao que lle foi suprimido o talón e o bulbo, e retén unhas medidas de 122,3 x 80,3 x 50,6 mm e 479 g.

4.2.7. *Macroutensilios bifaciais*

A presenza de macroutensilios resulta marxinal (0,2 %) e está constituída por dous bifaces, un triedro e un fendedor. Os bifaces, de tipo amigdaloides e tendencia micoquiense, son algo irregulares e confeccionados de xeito expeditivo (menos de 20 negativos en ambos os casos). As medidas son de 112,2 x 80,2 x 47,4 mm e 354 g no primeiro; e 160,0 x 96,5 x 57,5 mm e 954 g no segundo. O triedro confeccionouse sobre unha lasca de totalmente cortical e unhas medidas de 127,6 x 81,5 x 47,8 mm e 637 g. A súa base está sen tallar e a cortiza ocupa todo o reverso, cun índice de configuración do 74 %.

5. Conclusións

O desenvolvemento deste proxecto INOU-Campus da Auga 2023 supón un punto de inflexión na investigación dos primeiros grupos humanos do que hoxe entendemos como Ourense. A pesar de que a destrución do xacemento impide afondar en aspectos importantes, os datos obtidos son significativos e permiten resolver algunhas das incógnitas do xacemento da Piteira, especialmente a súa adscrición cultural. Inicialmente considerouse que era musteriense, logo acheuliano e posteriormente clasificouse como musteriense de tradición acheuliana. Unha vez analizado o conxunto de material, as características tecnolóxicas do xacemento da Piteira encaixan perfectamente cos parámetros do coñecido para o musteriense do occidente da península ibérica. Entre os trazos máis significativos está a baixa presenza de utensilios de gran formato, a porcentaxe moi significativa de retocados sobre lasca e, sobre todo, o uso habitual de esquemas organizados de obtención de lascas, segundo modalidades discoides e Levallois.

Agora ben, dadas as características homoxéneas da tecnoloxía musteriense na península, é difícil posicionalo nun intre concreto, dentro do rango de desenvolvemento desta tecnoloxía (30000-27000 anos). Por analogía co rexistro identificado no xacemento da Cova Eirós, as características do conxunto da Piteira amosan concomitancias tecnolóxicas, que poden apuntar cara a unha cronoloxía semellante, cara aos 40000-30000 anos.

6. Referencias

- [1] Senín Fernández, I. J. (1995). A investigación do Paleolítico en Galicia: revisión bibliográfica. Edicións do Castro.
- [2] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Duval, M., Demuro, M., & Arnold, L. J. (2018). First evidence of an extensive Acheulean large cutting tool accumulation in Europe from Porto Maior (Galicia, Spain). *Scientific Reports*, 8(1), 3082.
- [3] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Arnold, L. J., Cunha-Ribeiro, J., da Silva, P. X., Demuro, M., Gomes, A., Meireles, J., Monteiro-Rodrigues, S., & Pérez-González, A. (2020). The Acheulean technocomplex of the Iberian Atlantic margin as an example of technology continuity through the Middle Pleistocene. *Journal of Paleolithic Archaeology*, 3(4), 918-943.
- [4] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Demuro, M., Arnold, L. J., & Duval, M. (2021). Early human occupations in NW Iberia: The archaeological record of the Lower Miño basin during the second half of the Middle Pleistocene. *Comptes Rendus Palevol*, 20(1), 1-19.
- [5] Méndez-Quintas, E., Demuro, M., Arnold, L. J., Duval, M., Pérez-González, A., & Santonja, M. (2019). Insights into the late stages of the Acheulean technocomplex of Western Iberia from the Arbo site (Galicia, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 27, 101934.
- [6] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Demuro, M., Arnold, L. J., Duval, M., Díaz-Rodríguez, M., & Serodio-Domínguez, A. (2020). El yacimiento de Arbo en el contexto del Paleolítico antiguo del SW de Europa. En E. Méndez-Quintas (Ed.), *El poblamiento humano del NW peninsular durante el Paleolítico inferior: Un yacimiento achelense de finales del Pleistoceno Medio en Arbo (Pontevedra, Galicia)* (pp. 333-364). Universidad de Vigo.
- [7] Vázquez Varela, J. M. (1973). Contribución al estudio del paleolítico gallego. La comarca de río Arenteiro. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, XXVIII, 13-22.
- [8] Vences Veiga, B., & Vázquez Monxardín Fernández, A. (1978). Novos xacementos paleolíticos da provincia de Ourense. *Boletín Auriense*, III, 301-313.
- [9] Gallegos, I. d. E. (1979). Prehistoria e Arqueoloxía de Galicia. Estado da cuestión. Sección de Arqueoloxía e Prehistoria do Insatituto de Estudos Galegos "P. Sarmiento".
- [10] Vázquez Varela, J. M. (1984). Paleolítico y mesolítico en Galicia: estado actual de la cuestión : problemas y perspectivas. *Portugalia.Nova Serie*, IV/V, 21-25.
- [11] Rodríguez Gracia, V. (1976). Notas sobre el yacimiento paleolítico de A Piteira, Toén (Orense). *Boletín Auriense*, I, 25-42.

- [12] Lombera-Hermida, A. d., Rodríguez-Álvarez, X.-P., Iglesias, A. A., Rodríguez, M. D., Iván Rey-Rodríguez, U., Tejedor, I. V., Pérez-Alberti, A., Cunha, P. P., García, H. B. A. L., Moreira, X. A., Salgueiro, C. L., Castro, T. M., & Valcarce, R. F. (2021). Between two worlds: Cova Eirós and the Middle-Upper Palaeolithic transition in NW Iberia. *Comptes Rendus Palevol*(42), 859-886.
- [13] Cano Pan, J. A. (1993). Análisis historiográfico del Paleolítico en Galicia. *Semata*, 5, 29-52.
- [14] Vázquez Varela, J. M. (2000). El Paleolítico en el noroeste de la Península Ibérica. *Spal. Revista de Prehistoria y Arqueología*, 9, 69-80.
- [15] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., & Pérez-González, A. (2020). El primer poblamiento humano en el noroeste peninsular. En E. Méndez-Quintas (Ed.), *El poblamiento humano del NW peninsular durante el Paleolítico inferior: Un yacimiento achelense de finales del Pleistoceno Medio en Arbo (Pontevedra, Galicia)* (pp. 13-120). Universidade de Vigo.
- [16] Monteiro Rodrigues, S., Cunha Ribeiro, J. P., Méndez-Quintas, E., Ferreira, C., Xavier, P., Meireles, J., Gomes, A., Santonja, M., & Pérez-González, A. (2020). O projeto Miño/Minho: balanço de quatro anos de trabalhos arqueológicos. En J. M. Arnaud, C. Neves, & A. Martins (Eds.), *Arqueologia em Portugal, 2020-Estado da Questão* (pp. 661-676). Associação dos Arqueólogos Portugueses.
- [17] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Arnold, L. J., Demuro, M., & Duval, M. (2020). A multidisciplinary overview of the lower Miño River terrace system (NW Iberian Peninsula). *Quaternary International*, 566-567, 57-77.
- [18] Vaquero, M., van der Made, J., Blain, H.-A., Ibáñez, N., López-García, J. M., Rivals, F., Alonso, S., Ameijenda, A., Bennàsar, M., Fernández-García, M., de Lombera-Hermida, A., & Valverde, I. (2018). Fauna, environment and human presence during MIS5 in the North of Spain: The new site of Valdavara 3. *Comptes Rendus Palevol*, 17(8), 557-593.
- [19] Cano Pan, J. A., Aguirre, E., Giles Pacheco, F., Gracia Prieto, J., Santiago Pérez, A., Mata Almonte, E., Gutiérrez López, J. M., Díaz Del Olmo, F., Baena Escudero, R., & Borja, F. (1997). Evolución del Pleistoceno en la cuenca baja del Miño, sector La Guardia-Tuy. Secuencia de los primeros poblamientos humanos y registro arqueológico. En J. Rodríguez Vidal (Ed.), *Cuaternario Ibérico* (pp. 201-212). AEQUA.
- [20] Cano Pan, J. A., Aguirre, E., Giles Pacheco, F., Gracia Prieto, F. J., Santiago Pérez, A., Mata Almonte, E., Gutierrez López, J. M., Aguilera Rodríguez, L., & Prieto Reina, O. (1999). Secuencia cronoestratigráfica y poblamiento paleolítico en la cuenca Media-Baja de Río Miño. Sector Tuy (Pontevedra)-Cortegada (Ourense). En L. Pallí Buxó & C. Roqué i Pau (Eds.), *Avances en el estudio del Cuaternario español (secuencias, indicadores paleambientales y evolución de procesos)* (pp. 231-240). Universitat de Girona.

- [21] Villar Quinteiro, R. (2012). Primeras ocupaciones humanas en el noroeste peninsular. *Gallaecia*, 31, 5-16.
- [22] Aguirre, E. (1964). *Las Gándaras de Budiño Porriño (Pontevedra)*. Ministerio de Educación Nacional.
- [23] Méndez-Quintas, E. (2020). El poblamiento humano del NW peninsular durante el Paleolítico inferior: Un yacimiento achelense de finales del Pleistoceno Medio en Arbo (Pontevedra, Galicia). *Universidade de Vigo*.
- [24] Nonn, H. (1966). *Les Régions Côtières de la Galice (Espagne). Étude géomorphologique*. Université de Strasbourg.
- [25] Aguirre, E., & Butzer, K. W. (1967). Problematical Pleistocene artifact assemblage from Northwestern Spain. *Science*, 157(3787), 430-431.
- [26] Butzer, K. W. (1967). Geomorphology and Stratigraphy of the Palaeolithic site of Budiño. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 18(31-32), 82-103.
- [27] Echaide, M. D. (1971). La industria lítica del yacimiento de Budiño (Pontevedra, España). *Munibe*, XXIII(1), 125-154.
- [28] Vidal Encinas, J. M. (1982). Las Gándaras de Budiño: balance preliminar de dos campañas de excavaciones (1980-1981). *El Museo de Pontevedra*, XXXVI, 91-114.
- [29] Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Arnold, L., Cunha Ribeiro, J. P., Demuro, M., Díaz-Rodríguez, M., Duval, M., Gomes, A., Meireles, J., Monteiro-Rodrigues, S., & Serodio Domínguez, A. (2018). El yacimiento achelense de As Gándaras de Budiño: Síntesis y perspectivas después de 50 años de desencuentros. *Estudios do Cuaternario*, 19, 1-22.
- [30] de Lombera-Hermida, A., López Cordeiro, M. d. M., Cerqueiro Landín, D., Díaz-Rodríguez, M., Ameijenda Iglesias, A., Rodríguez Álvarez, X. P., & Fábregas Valcarce, R. (2018). As Gándaras de Budiño: nuevos datos para una revisión. En (pp. 137-164). *Universidade de Santiago de Compostela*.
- [31] Méndez-Quintas, E. (2007). El yacimiento achelense de As Gándaras de Budiño: la industria en facies fluviales. *Complutum*(18), 27-46.
- [32] Méndez-Quintas, E. (2008). La industria lítica de las facies coluviales del yacimiento achelense de As Gándaras de Budiño. *El Locus V en las excavaciones de Vidal Encinas*. *Zephyrus*, 62(0), 41-61.
- [33] Méndez-Quintas, E., Villar Quinteiro, R., Santonja, M., Pérez-González, A., & Ledo Bernárdez, M. (2006). Valoración preliminar del yacimiento paleolítico de Portomaior, As Neves, Galicia. *Zona arqueológica*, 7, 184-193.
- [34] Villar Quinteiro, R. (2011). Datos finales del yacimiento achelense de Portomaior, As Neves, Pontevedra. *Gallaecia*, 30, 53-66.

- [35] Méndez-Quintas, E. (2017). Caracterización y variabilidad tecnomorfológica de las industrias achelenses de la cuenca baja del río Miño (NO de la Península Ibérica).
- [36] Demuro, M., Arnold, L. J., Duval, M., Méndez-Quintas, E., Santonja, M., & Pérez-González, A. (2020). Refining the chronology of Acheulean deposits at Porto Maior in the River Miño basin (Galicia, Spain) using a comparative luminescence and ESR dating approach. *Quaternary International*, 556, 96-112.
- [37] Méndez-Quintas, E., Pérez-González, A., Ledo Bernárdez, M., & Serodio Domínguez, A. (2018). La industria lítica del yacimiento Achelense de Arbo (Pontevedra). *Variables del Paleolítico Inferior de Galicia en el contexto peninsular*. *Zephyrus*, 82, 3-34.
- [38] Key, A. J. M., Jarić, I., & Roberts, D. L. (2021). Modelling the end of the Acheulean at global and continental levels suggests widespread persistence into the Middle Palaeolithic. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(1).
- [39] Cano Pan, J. A., Giles Pacheco, F., Aguirre, E., Santiago Pérez, A., Gracia Prieto, F. J., Mata Almonte, E., Gutierrez López, J. M., & Prieto Reina, O. (2000). Middle Palaeolithic tecnocomplexes and lithic industries in the northwest of the Iberian Peninsula. En C. Stringer, R. N. E. Barton, & C. Finlayson (Eds.), (pp. 49-57).
- [40] Villar Quinteiro, R. (1997). El yacimiento paleolítico de Pazos en San Ciprian de Viñas (Ourense). *Boletín Auriense*, 27, 9-25.
- [41] Nespereira Iglesias, J. (1982). Apuntes para un estudio del contexto geológico del yacimientos paleolítico de Pazos (San Cibrán das Viñas, Orense). *Boletín Auriense*, XII, 27-30.
- [42] Villar Quinteiro, R. (1999). El yacimiento paleolítico de A Chaira, San Cibrán de Lás (Ourense). *Boletín Auriense*, 29, 9-22.
- [43] López Cordeiro, M. d. M. (2004). Resultados obtenidos en la construcción de una "Nueva Arqueología" del Paleolítico gallego. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, LI, 133-151.
- [44] López Cordeiro, M. d. M. (1998). Aproximación a la problemática del Paleolítico Inferior gallego: estudio de la cuenca media del Miño. *Gallaecia*, 17, 49-67.
- [45] López Cordeiro, M. d. M. (2001). Estudio de depósitos con industrias líticas del Paleolítico Inferior y Medio en la cuenca media del Miño (Ourense). *TAPA: traballos de arqueoloxía e patrimonio*, 24.
- [46] Ameijenda-Iglesias, A., De Lombera-Hermida, A., Pérez-Alberti, A., Rodríguez-Álvarez, X. P., & Fábregas-Valcarce, R. (2010). Geomorphological and geoarchaeological evolution of the Monforte de Lemos basin (Galicia, Spain). Erosion phases and post-depositional processes in NW Iberia. *Estudos do Quaternário / Quaternary Studies*, 6(6), 5-22.

- [47] Fábregas Valcarce, R., Alonso Fernández, S., Ameijenda Iglesias, A., Fernadez Marchena, J., Grandal d'Anglade, A., Lazuén Fernández, T., Lombera Hermida, A., Pérez Rama, M., Rodríguez Álvarez, X. P., Vaquero Rodríguez, M., & Veiga Moares, A. (2011). Variabilidade das ocupacións paleolíticas na cunca media do Miño. *Gallaecia*, 30, 5-27.
- [48] Fábregas Valcarce, R., Alonso Fernández, S., Ameijenda Iglesias, A., Grandal d'Anglade, A., Lazuén Fernández, T., Lombera Hermida, A., Pérez Alberti, A., Pérez Rama, M., Rodríguez Álvarez, X. P., Serna González, M. R., & Vaquero Rodríguez, M. (2010). Completando o mapa. Novas datacións absolutas para o Paleolítico e Mesolítico do interior galego. *Gallaecia*, 29, 5-28.
- [49] Villar Quinteiro, R. (1996). El yacimiento paleolítico de "A Piteira" (Toén) Ourense. *Boletín Auriense*, 26, 9-26.
- [50] Lombera Hermida, A. (2005). Aplicación del sistema lógico analítico al estudio de un yacimiento gallego. La industria lítica de A Piteira (Toén, Ourense). *Gallaecia* (24), 7-33.
- [51] Díez Montes, A., González Menéndez, L. Martínez Catalán, J.R. y Gallastegui, G. (2010). Mapa Geológico Digital continuo E. 1:50.000, Zona Galicia Tras-os-Montes (Zona 1200) in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España [en liña]. Disponible en:<https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?id=Z1200..>
- [52] de Lombera Hermida, A., Rellán, C. R., & Rodríguez, M. V. (2016). El sílex en el NW de la Península Ibérica. Un estado de la cuestión. *Cuadernos de prehistoria y arqueología de la Universidad de Granada*, 26, 137-155.

Caracterización do uso do espazo escolar mediante posicionamento en tempo real do alumnado a través de dispositivo de localización UWB

Pedro Orgeira-Crespo¹ e María Isabel Mociño González²

¹Departamento de Mecánica, Máquinas, Motores Térmicos e Fluídos.

Campus de Ourense. Universidade de Vigo

²Departamento de Didácticas Especiais. Campus de Ourense. Universidade de Vigo

porgeira@uvigo.gal; imocino@uvigo.gal

Este proxecto centrouse no desenvolvemento e na implementación dun innovador sistema de localización en tempo real, especificamente para o seu uso en interiores. Este sistema utilizou tecnoloxía de banda ultralarga (UWB) para rastrexar con precisión o movemento do estudantado dentro das instalacións de calquera escola. O obxectivo principal era equipar cada estudante cunha baliza de localización portátil, pequena e liviá, destinada a gardala nos seus petos durante o seu tempo na escola.

O sistema deseñado presentaba múltiples antenas deseñadas especificamente para operar dentro do largo de banda UWB. Estas antenas colocáronse estratexicamente para capturar e rastrexar a localización do estudantado en tempo real. O sistema non só proporcionou información sobre as súas posicións actuais, senón que tamén rexistrou os seus movementos ao longo do tempo, incluídas as direccións e a velocidade. Este seguimento integral permitiu unha análise detallada de como o estudantado navega

e interactúa dentro de diferentes áreas da escola. Con este sistema pódese estudar o seu comportamento dentro e fóra das aulas e relacionar calquera característica (sexo, idade, rendemento deportivo, escolar...) coa súa interacción ao longo do período de tempo no que están nas aulas/patio escolar.

Palabras clave: UWB, sistema de localización en interiores e posicionamento en tempo real

1. Introducción

As habilidades motrices expresivas das criaturas constitúen un dos recursos máis significativos á hora de identificar o rendemento comunicativo e as relacións sociais no contexto escolar [1], de xeito especialmente significativo nas primeiras etapas do desenvolvemento. Dende a perspectiva da saúde, os niveis de actividade física nos primeiros anos da infancia ocasionan unha serie de resultados positivos, como a mellora da adiposidade, o desenvolvemento cognitivo e a saúde psicosocial e cardiometabólica [2]. Unha recente metaanálise [3] manifestou a importancia de monitorizar estas variables na aula para garantir un adecuado desenvolvemento nas primeiras etapas. Con todo, a día de hoxe, son escasos os recursos tecnolóxicos dispoñibles para a súa avaliación obxectiva, especialmente no ámbito escolar, onde estas valoracións se fan fundamentalmente a través da observación directa, pulsómetros ou mediante gravacións en vídeo, o que provoca unha avaliación de carácter subxectivo, habitualmente con escasa fiabilidade e validez.

Aínda que en diferentes ámbitos de exteriores existen metodoloxías probadas para a localización de persoas (GPS), non existe un mecanismo deseñado especificamente para o posicionamento do alumnado no eido educativo. Diseñar un sistema de posicionamento para interiores é importante por varias razóns:

- Precisión: a precisión do sistema de posicionamento é crucial para moitas aplicacións interiores, como o seguimento de activos, a asistencia sanitaria e a loxística. O sistema debe deseñarse para proporcionar información de posición precisa en tempo real. Isto require unha consideración coidadosa do algoritmo de posicionamento, procesamento de sinal e deseño de hardware.

- Escalabilidade: o sistema de posicionamento interior debe ser escalable para manexar un gran número de nodos ou de etiquetas no ambiente interior. Isto require

unha consideración coidadosa da arquitectura do sistema, a topoloxía da rede e os protocolos de comunicación.

- Interferencia: o sistema debe estar deseñado para minimizar as interferencias doutros dispositivos sen fíos que operan no mesmo ambiente. Isto require unha consideración coidadosa do espectro de frecuencias, as técnicas de modulación e os algoritmos de procesamento de sinal.

- Duración da batería: o sistema de posicionamento debe estar deseñado para conservar a duración da batería, tanto para os nodos coma para as etiquetas. Isto require unha consideración coidadosa das técnicas de xestión de enerxía, a potencia de transmisión e os protocolos de comunicación.

- Custo: o sistema debe deseñarse para ser rendible para o implantar a grande escala. Isto require unha consideración coidadosa dos compoñentes do hardware, do proceso de fabricación e dos custos de mantemento.

En resumo, deseñar un sistema de posicionamento de interiores é importante para proporcionar información de posición precisa en tempo real, escalabilidade, mitigación de interferencias, conservación da vida útil da batería e rendibilidade. Nese sentido, púxose en marcha o presente proxecto.

A implementación exitosa do sistema de posicionamento baseado na UWB foi un logro significativo na mellora da xestión e da seguridade escolares. O proxecto mostrou o potencial da tecnoloxía de vangarda para monitorizar e comprender a dinámica do movemento do estudantado en tempo real, abrindo posibilidades para mellorar os protocolos de seguridade, optimizar a distribución das escolas e obter información sobre o comportamento e as preferencias do estudantado dentro da contorna educativa.

A tecnoloxía de banda ultralarga (UWB) [4] é unha tecnoloxía de comunicación sen fíos que utiliza un amplo espectro de frecuencias para transmitir datos a distancias curtas con alta precisión. A diferenza das tecnoloxías de comunicación de banda estreita tradicionais que utilizan unha frecuencia específica ou un rango estreito de frecuencias, a UWB propaga o seu sinal a través dunha banda de frecuencia ampla. Isto permite a transmisión de pulsos curtos que ocupan unha gran parte do espectro de frecuencia. A

UWB é coñecida pola súa capacidade para proporcionar medicións precisas do tempo de voo e altas taxas de transferencia de datos, o que a fai particularmente adecuado para aplicacións que requiren posicionamento e localización precisos.

No contexto do proxecto, empregouse a tecnoloxía UWB para permitir a localización en tempo real do estudantado dentro da contorna escolar. As balizas de localización portátiles, pequenas e lixeiras, que levaba cada estudante, emitían sinais UWB a intervalos específicos. O sistema estaba equipado con múltiples antenas situadas estratexicamente en toda a escola, operando dentro do largo de banda UWB.

Estas antenas recibiron os sinais UWB transmitidos polas balizas portátiles e o sistema aproveitou a información do tempo de voo dos sinais para calcular a distancia entre a baliza e cada antena. Ao triangular estas medicións de distancia desde múltiples antenas, o sistema puido determinar con precisión a posición 3D de cada estudante en tempo real. Logo, estes datos procesáronse para rastrexar os movementos do estudantado, incluída a súa dirección e velocidade, e creouse un sistema de localización dinámico e integral en tempo real.

A vantaxe de utilizar a tecnoloxía UWB neste contexto radica na súa capacidade de proporcionar información de localización precisa mesmo en contornas complexas e con gran cantidade de persoas, o que a fai moi adecuada para aplicacións como o seguimento do movemento de persoas dentro dunha contorna escolar. A alta precisión e confiabilidade da localización baseada na UWB contribúen ao éxito do proxecto ao lograr o seu obxectivo de monitorizar en tempo real as posicións do estudantado dentro das instalacións da escola.

2. Materiais e métodos

O primeiro logro notable do proxecto foi o deseño exitoso dun innovador circuíto de banda ultralarga (UWB), que serviu como un sistema de localización en tempo real livián, pequeno e portátil. Este circuíto foi unha compoñente clave no desenvolvemento da tecnoloxía do proxecto, proporcionando a base para rastrexar con precisión o movemento do estudantado dentro da contorna escolar. O deseño priorizou a compactidade e a eficiencia, o que asegura que as balizas de localización que levaba

o estudantado fosen prácticas, fáciles de manexar e minimamente intrusivas nas súas actividades diarias.

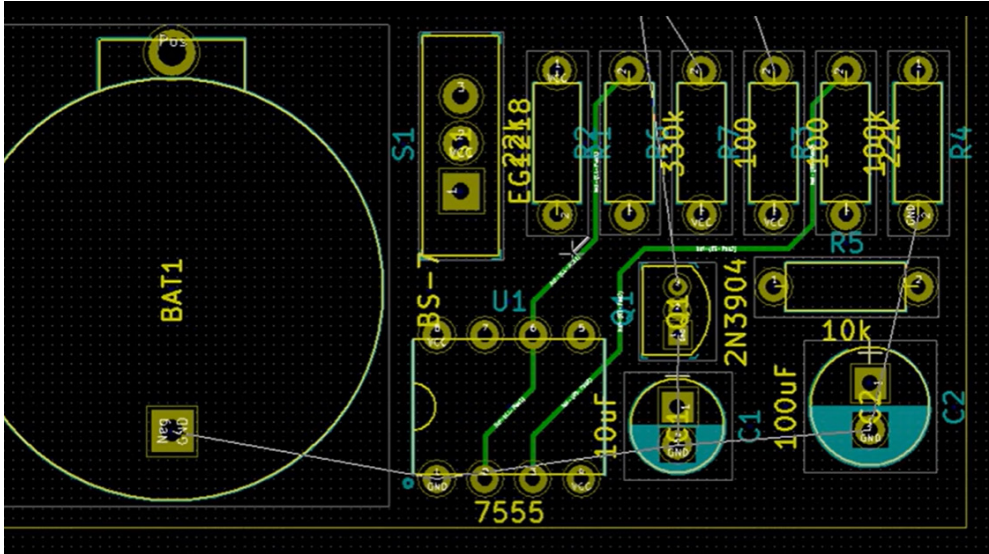


Figura 1. Parte inferior do deseño da PCB (Printed Circuit Board) no que se aprecia o seu tamaño compacto

A localización en tempo real implica determinar a posición actual dun obxecto ou persoa nunha contorna determinada. Pódense empregar varias tecnoloxías e técnicas para a localización en tempo real, cada unha coas súas propias fortalezas e limitacións. Cando o uso é para exteriores, o GPS é unha das opcións máis habitualmente empregadas; no caso de localización en interiores, isto non é posible.

O GPS (sistema de posicionamento global) baséase en sinais transmitidos desde satélites que orbitan ao redor da Terra, o que o converte nun excelente sistema de posicionamento exterior con cobertura global. Con todo, enfróntase a importantes desafíos cando se utiliza para a localización en interiores debido á incapacidade dos sinais de satélite para penetrar os edificios de forma eficaz. A arquitectura do GPS baséase nunha liña de visión clara entre o receptor GPS e múltiples satélites para triangular a posición do usuario ou usuaria con precisión. No interior, os sinais atopan obstáculos como paredes, teitos e outras estruturas, o que provoca atenuación e reflexión do sinal. Como resultado, a precisión e a confiabilidade do GPS dentro dos

edificios vense gravemente comprometidas, o que, a miúdo, é pouco práctico para o posicionamento en interiores.

En ambientes interiores, o efecto de traxectorias múltiples convértese nun obstáculo importante para a precisión do GPS. Os sinais que rebotan nas superficies crean múltiples camiños para que os sinais GPS cheguen ao receptor, o que xera interferencias no sinal e imprecisións na posición calculada. Ademais, o número limitado de satélites visibles dispoñibles en espazos interiores diminúe aínda máis a capacidade do sistema para triangular posicións de forma eficaz. A combinación destes factores dá como resultado datos de localización pouco fiables e imprecisos, o que fai que o GPS non sexa adecuado para as aplicacións que requiren unha localización interior precisa.

Para tratar as limitacións do GPS en contornas interiores, desenvolvéronse tecnoloxías alternativas como sistemas de posicionamento baseados en wifi, balizas baseadas en Bluetooth, sistemas de banda ultralarga (UWB) e outros enfoques de fusión de sensores. Estas solucións aproveitan a infraestrutura dentro dos edificios ou implementan dispositivos dedicados para proporcionar unha localización interior máis precisa e confiable, superando os desafíos que expoñen as limitacións dos sinais GPS en espazos interiores.

Dadas as diversas opcións dispoñibles para o posicionamento en interiores, as tecnoloxías que se avaliaron foron as seguintes:

As tecnoloxías de localización en interiores experimentaron avances significativos para tratar os desafíos que expoñen as limitacións dos sistemas de posicionamento en exteriores, como o GPS, dentro de espazos pechados. Xurdiron varias tecnoloxías como solucións viables para a localización en interiores, cada unha coas súas características e aplicacións únicas. Aquí exploramos algunhas tecnoloxías destacadas de localización en interiores, incluídas RFID, Bluetooth, UWB e outras.

RFID (identificación por radiofrecuencia)

A RFID é unha tecnoloxía sen fíos que utiliza campos electromagnéticos para identificar e rastrexar obxectos equipados con etiquetas RFID. Na localización en

interiores, os sistemas RFID adoitan consistir en etiquetas RFID adheridas a obxectos ou a persoas e a lectores RFID colocados estratexicamente en toda a contorna.

A medida que un obxecto etiquetado se move dentro do alcance dos lectores RFID, pódese determinar a súa localización. Aínda que a RFID é rendible e adecuada para determinadas aplicacións como o seguimento de activos, a súa precisión pode verse limitada para un posicionamento preciso en interiores.

Localización baseada en Bluetooth

A tecnoloxía Bluetooth gañou popularidade para o posicionamento en interiores debido ao seu uso xeneralizado en teléfonos intelixentes e outros dispositivos. As balizas Bluetooth de baixa enerxía (BLE) impleméntanse en espazos interiores e os dispositivos móbiles equipados con Bluetooth reciben sinais destas balizas para determinar a súa localización.

As balizas BLE ofrecen unha precisión razoable e o seu baixo consumo de enerxía fainas adecuadas para diversas aplicacións, incluída a navegación en espazos comerciais e servizos baseados na localización.

Sistemas de posicionamento baseados en wifi

A localización interior baseada en wifi aséntase nos sinais dos puntos de acceso wifi dentro dunha instalación. Ao triangular os sinais recibidos desde múltiples puntos de acceso, pódese determinar a posición dun dispositivo.

O posicionamento wifi adóptase amplamente debido á prevalencia da infraestrutura wifi e pode ofrecer unha precisión razoable. Con todo, pode enfrontar desafíos en contornas nas que hai moitos elementos para localizar e require unha rede densa de puntos de acceso para un rendemento óptimo (acaba converténdose nun sistema caro).

Sistemas de navegación inercial (INS)

Os sistemas de navegación inercial utilizan acelerómetros e xiroskopios para medir cambios na velocidade e na orientación, o que permite unha localización

continua sen infraestrutura externa. Os INS pódese empregar en diversas aplicacións, incluída a navegación en interiores para experiencias de realidade virtual ou realidade aumentada.

A pesar da súa facilidade de implementación, os INS tenden a sufrir erros acumulados ao longo do tempo, que requiren correccións periódicas, e por iso nunca se empregan como único sistema de posicionamento.

Visión por computadora

As técnicas de visión por computadora, que involucran cámaras e algoritmos de procesamento de imaxes, gañaron terreo para a localización en interiores. Ao recoñecer características ou marcadores visuais dentro dunha contorna, os sistemas de visión por computadora poden determinar a posición de obxectos ou de individuos.

Esta tecnoloxía é particularmente eficaz en contornas ben iluminadas e atopa aplicacións en robótica, seguridade e realidade aumentada, e precisa dunha instalación fixa.

UWB (banda ultralarga)

A tecnoloxía UWB utiliza pulsos de curta duración cun amplo espectro de frecuencia para unha localización interior precisa. Os sistemas baseados en UWB miden o tempo de voo destes pulsos entre un transmisor e un receptor, o que permite realizar cálculos de distancia precisos.

A UWB é coñecida pola súa alta precisión, o que o fai adecuado para aplicacións onde a información de localización precisa é crucial, como o seguimento de activos, a automatización industrial e a atención médica.

Cada unha destas tecnoloxías de localización en interiores ten o seu propio conxunto de vantaxes e limitacións, e a elección depende dos requisitos específicos da aplicación, incluídas consideracións de precisión, custo e infraestrutura. A miúdo, emprégase unha combinación destas tecnoloxías ou un enfoque híbrido para mellorar o rendemento xeral e tratar os desafíos que expoñen as diversas contornas interiores.

En calquera caso, como mellor combinación de funcionalidade, economía, precisión e facilidade de instalación optouse pola UWB.

Dentro de cada unha das tecnoloxías, existen diferentes técnicas que se poden empregar para, unha vez que se adquiriu o sinal electrónico que se vai empregar para a localización, facer esta máis precisa. Estas foron algunhas das alternativas clave que se avaliaron:

- *RSSI (indicador de intensidade do sinal recibido)*

O RSSI baséase en medir a intensidade do sinal de radio recibida entre un transmisor e un receptor. A medida que cambia a distancia entre eles, varía a intensidade do sinal. É fácil de implementar, especialmente en sistemas de comunicación sen fíos.

Como contra ten que é susceptible a interferencias, efectos multitraxecto e atenuación do sinal, o que o fai menos preciso en certas contornas.

- *Tempo de voo (ToF)*

O ToF mide o tempo que tarda un sinal en viaxar desde un transmisor a un receptor. Ao coñecer a velocidade de propagación do sinal, pódese calcular a distancia. Como vantaxe ten que é de alta precisión, especialmente en contornas controladas; ademais, aféctao menos a interferencia multitraxecto en comparación con RSSI.

Como contra, pode requirir mecanismos de sincronización precisos (a precisión pode verse afectada por factores ambientais).

- *Hora de chegada (ToA)*

O funcionamento é similar ao ToF, xa que traballando con ToA mídese o tempo que tarda un sinal en viaxar desde o transmisor ata o receptor. A diferenza radica en como se mide o tempo.

É notable o ben que proporciona medicións de distancia precisas e pódese implementar con diferentes tipos de sinais (por exemplo, acústicas ou electromagnéticas), polo que é moi habitual o seu uso en posicionamento. Hai que ter en conta que é susceptible de ter erros de sincronización do reloxo e pode requirir unha sincronización precisa.

- *Alcance*

O método de alcance (*ranging*) determina distancias medindo a distancia entre dous puntos. Isto pódese lograr utilizando varios métodos, como ultrasón, infravermellos ou sinais de radiofrecuencia. É un dos métodos máis versátiles, con aplicacións tanto en ambientes interiores coma exteriores.

A maior dificultade que ofrece, e un dos seus máis importantes problemas, é que a precisión pode verse afectada polas condicións ambientais e a tecnoloxía de alcance específica utilizada. Isto faino moi sensible a problemas de interferencias.

A elección do método de localización depende de factores como a precisión requirida, a contorna na que se utilizará, consideracións de custos e as características específicas da aplicación. A miúdo, emprégase unha combinación destas técnicas nun sistema híbrido para superar as limitacións individuais e mellorar o rendemento xeral. No noso caso, empregouse o tempo de voo (ToF), xa que é un método bastante tolerante a problemas de interferencias, non demanda moita batería e xa se tiña experiencia no mecanismo por proxectos anteriores.

O método de tempo de voo (ToF), cando se implementa con tecnoloxía de banda ultralarga (UWB), representa un enfoque poderoso para lograr unha localización interior precisa. A tecnoloxía UWB utiliza pulsos de curta duración cun amplo espectro de frecuencia, o que permite unha medición precisa do tempo que tardan os sinais en viaxar entre un transmisor e un receptor. O método ToF aproveita estas características para calcular distancias e, posteriormente, determinar a localización de obxectos ou individuos dentro de espazos interiores.

Nun sistema ToF baseado en UWB, o proceso comeza cun transmisor UWB que emite pulsos curtos de sinais de radiofrecuencia. Estes pulsos propáganse pola contorna e chegan a receptores UWB estratexicamente situados no espazo. Ao medir con precisión o tempo que tarda o sinal en viaxar desde o transmisor ao receptor, o sistema pode calcular a distancia entre eles utilizando a velocidade da luz.

A precisión do método ToF na localización de interiores baseada en UWB é unha característica destacada. A diferenza dos métodos de posicionamento sen fíos

tradicionais que poden ser susceptibles a interferencias de traxectorias múltiples, os pulsos curtos e o amplo largo de banda de UWB contribúen a un rendemento sólido. A interferencia de traxectorias múltiples ocorre cando os sinais se reflicten nas superficies e crean múltiples rutas para que o sinal chegue ao receptor. A UWB, cos seus pulsos curtos, pode distinguir entre sinais directos e reflectidos, o que permite medicións de distancia máis precisas.

Ademais, a capacidade da UWB para proporcionar medicións de distancia de alta precisión faina moi adecuada para aplicacións que esixen unha precisión de centímetros. Isto é particularmente valioso en contornas interiores, onde a localización precisa é crucial para aplicacións como o seguimento de activos, a automatización industrial, a atención médica e mesmo as experiencias de realidade aumentada.

Outra vantaxe do ToF baseado na UWB para a localización en interiores é a súa capacidade para operar en contornas densas e complexas. O amplo ancho de banda permite unha comunicación eficaz e medicións de distancia mesmo en contornas con numerosos obstáculos, o que o fai adecuado para a súa implementación en diversas contornas interiores.

A implementación de sistemas ToF baseados na UWB para localización en interiores a miúdo implica colocar transmisores e receptores UWB estratexicamente en toda a contorna. Logo, o sistema calcula as distancias desde cada transmisor ata os receptores, crea un mapa tridimensional do espazo e permite o seguimento en tempo real de obxectos ou individuos.

En conclusión, o método *Time of Flight* (ToF) implementado con tecnoloxía UWB ofrece unha solución convincente para lograr unha localización en interiores de alta precisión. A súa precisión, resistencia a interferencias de traxectorias múltiples e capacidade para operar en contornas complexas convértena nunha tecnoloxía valiosa para aplicacións que requiren posicionamento e seguimento precisos en espazos interiores. É probable que o desenvolvemento e a adopción continuos de sistemas ToF baseados na UWB contribúan significativamente aos avances na localización en interiores en diversas industrias.

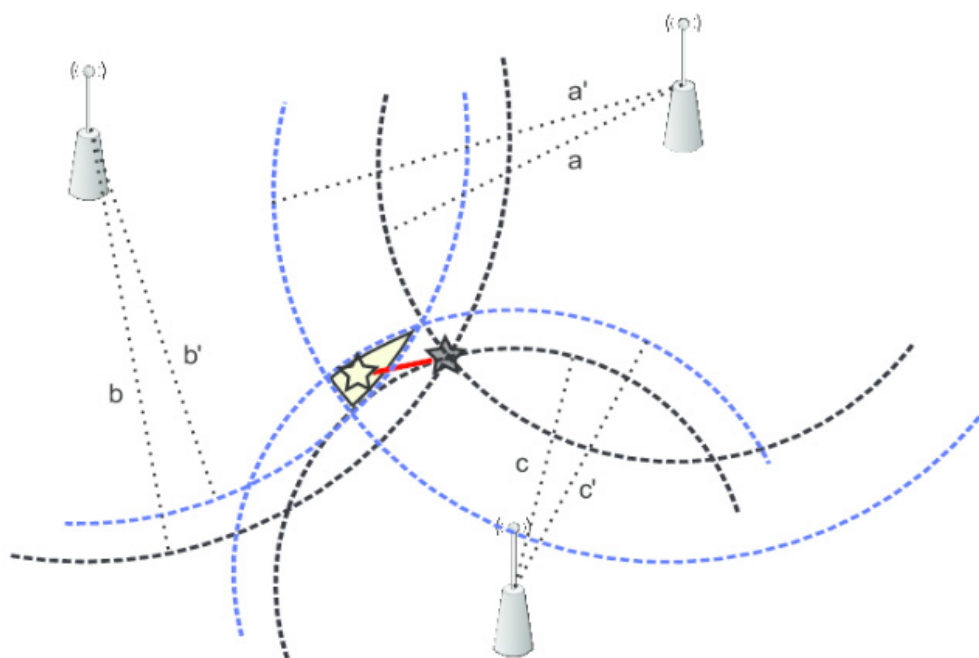


Figura 2. Mecanismo de detección e determinación de posición no sistema proposto

O integrado no que nos baseamos foi o D1000, actualmente de Qorvo. O chip DW1000, desenvolto por Decawave, é unha compoñente clave na tecnoloxía de banda ultralarga (UWB), deseñada especificamente para aplicacións que requiren medicións precisas do tempo de voo (ToF). Este chip gañou prominencia no campo dos sistemas de posicionamento en interiores debido á súa capacidade para proporcionar medicións de distancia precisas, o que o fai moi adecuado para aplicacións como seguimento de activos, navegación en interiores e sistemas de localización en tempo real (RTLS).

O chip DW1000 opera no rango de frecuencia de 6,5 Ghz a 6,75 Ghz, o que permite pulsos extremadamente curtos con duracións no rango de nanosegundos. Isto permite que o chip logre medicións de tempo de voo de alta resolución, o que contribúe á precisión dos sistemas de posicionamento en interiores baseados en UWB. A arquitectura do chip inclúe un transceptor, banda base dixital e unha interface de programación de aplicacións (API), o que proporciona unha solución integral para aplicacións UWB.

Para utilizar o chip DW1000 nun sistema de posicionamento en interiores baseado en tecnoloxía UWB e a técnica *Estafe of Flight* seguiuuse o seguinte proceso:

- *Configuración de hardware*

Integración do chip DW1000 no hardware do sistema de posicionamento. O chip interactúa cunha antena para a transmisión e a recepción de sinais, e é parte de nodos de ancoraxe ou etiquetas do alumnado segundo a arquitectura do sistema.

- *Configuración e iniciación*

Emprego da API do DW1000 para configurar e iniciar o chip. Con isto puidéronse configurar parámetros como a potencia de transmisión, a canle de comunicación e a velocidade de datos en función dos requisitos do sistema de posicionamento interior.

- *Implementación do nodo (antena)*

Implementación dos nodos de ancoraxe en localizacións coñecidas dentro do ambiente interior. Estes nodos de ancoraxe conteñen chips DW1000 e serviron como puntos de referencia para calcular as distancias a outros nodos ou etiquetas.

- *Implementación de etiquetas*

Implementación das etiquetas en encapsulamentos para ser portadas polo alumnado cuxas posicións deben ser rastrexadas. As etiquetas tamén conteñen chips DW1000 e son móbiles dentro da contorna. O chip de cada etiqueta comunícase cos nodos de ancoraxe para determinar a súa localización precisa mediante a técnica do tempo de voo.

- *Medición de distancia*

Iniciación da comunicación entre os nodos de ancoraxe e as etiquetas. O chip DW1000 no nodo de ancoraxe envía un sinal UWB e o chip na etiqueta recíbeo. Ao medir o tempo que tarda o sinal en viaxar entre eles, o sistema calcula a distancia utilizando a velocidade da luz.

- *Algoritmo de localización*

Implementación do algoritmo de localización que procese as medicións de distancia desde múltiples nodos de ancoraxe para triangular a posición da etiqueta con precisión. Para este fin empregouse o algoritmo de trilateración.

• *Seguimento en tempo real*

A posición das etiquetas tense que actualizar en tempo real a medida que se moven dentro do ambiente interior. A alta precisión das medicións do tempo de voo do chip DW1000 permite un seguimento preciso, mesmo en escenarios dinámicos.

As características do chip DW1000, como o baixo consumo de enerxía, a alta velocidade de datos e as medicións precisas de distancia, convérteno nun compoñente valioso para os sistemas de posicionamento en interiores. A súa integración na técnica de tempo de voo baseada en UWB facilita a creación de solucións de localización de interiores sólidas e precisas con aplicacións en todas as industrias.

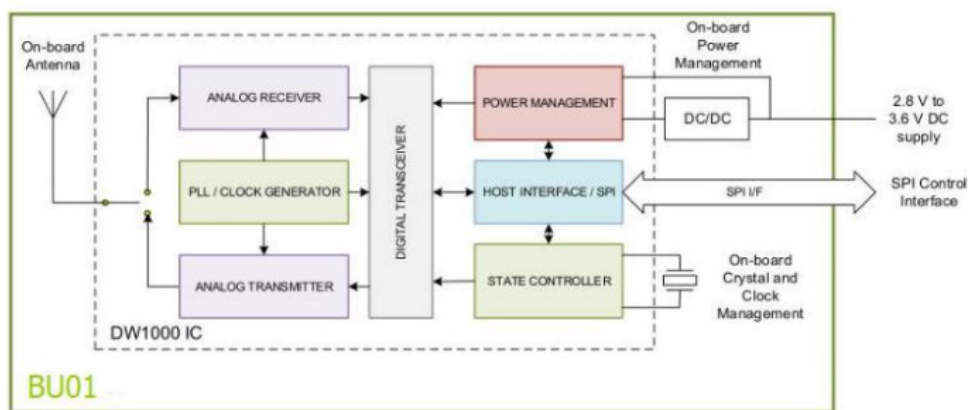


Figura 3. Esquema de implementación habitual para o uso do chip (fonte: Qorvo Systems)

O segundo logro foi a selección e a distribución óptima de antenas que operan dentro do rango de frecuencia UWB en todo o recinto escolar. A localización estratéxica destas antenas xogou un papel crucial á hora de determinar a posición precisa do estudantado en tempo real. Ao seleccionar coidadosamente as localizacións das antenas, o sistema puido capturar e triangular sinais das balizas portátiles, o que permitiu un seguimento preciso dos movementos do estudantado en varias áreas da escola. As características das antenas utilizadas nun sistema de localización en interiores baseado en tecnoloxía de banda ultralarga (UWB) son cruciais para lograr un posicionamento preciso e confiable. A continuación preséntanse algunhas características e consideracións clave para as antenas UWB nos devanditos sistemas:

- *Rango de frecuencia*

A tecnoloxía UWB opera nun amplo espectro de frecuencias que xeralmente oscila entre 3,1 Ghz e 10,6 Ghz. As antenas UWB foron seleccionadas para cubrir este amplo rango de frecuencias para garantir a compatibilidade cos sistemas de comunicación baseados na UWB.

- *Largo de banda*

Os sistemas UWB requiren antenas cun gran largo de banda para acomodar os pulsos de curta duración utilizados para medicións precisas do tempo de voo. Un amplo largo de banda permite que a antena transmita e reciba sinais con tempos de subida curtos, o que contribúe a cálculos de distancia precisos.

- *Patrón de radiación*

O patrón de radiación da antena describe como se distribúe a enerxía electromagnética no espazo. Para a localización en interiores, seleccionáronse antenas con patróns de radiación omnidireccionais para garantir a cobertura en todas as direccións, xa que os sinais UWB son menos direccionais en comparación cos sinais de banda estreita.

- *Tamaño e factor de forma*

Como o uso era destinado a contornas de interiores, onde o espazo pode ser limitado, utilizáronse deseños de antena compactos e de baixo perfil. O tamaño e o factor de forma foron adecuados para a integración tanto en nodos de ancoraxe coma en etiquetas móbiles dentro do sistema de posicionamento interior.

- *Ganancia*

A ganancia da antena inflúe na intensidade do sinal e no rango de cobertura. Aínda que unha alta ganancia pode ser desexable para un alcance estendido, debeuse equilibrar tendo en conta as posibles interferencias do sinal e os efectos de traxectorias múltiples en ambientes interiores.

- *Polarización*

A polarización das antenas UWB inflúe no rendemento do sistema. A polarización circular foi seleccionada, algo común nos sistemas UWB de interiores, xa que axuda a mitigar os efectos dos reflexos do sinal e a interferencia multitraxecto, o que contribúe a medicións máis confiables.

- *Coincidencia de impedancia*

Lograr unha adaptación de impedancia entre a antena e a liña de transmisión foi esencial para unha transferencia de enerxía eficiente. Coidouse ben que antena e etiquetas tivesen ben adaptada a impedancia para minimizar os reflexos do sinal e garantir que se irradiase a máxima potencia.

- *Altura e elevación*

A altura á que se instalan as antenas pode afectar o rendemento do sistema. Escolleuse elevar as antenas a unha altura coherente coa altura do alumnado para poder mellorar a cobertura do sinal e reducir posibles bloqueos, especialmente en contornas con obstáculos como mobles ou equipos.

- *Capacidade de manexo de enerxía*

As antenas tiveron que ter suficiente capacidade de manexo de potencia para adaptarse aos niveis de potencia de transmisión utilizados nos sistemas UWB. Esta consideración foi crucial para garantir a confiabilidade e a lonxevidade da antena na contorna operativa, pero respectando valores por baixo dos 200 mW para evitar posibles sensibilidades con respecto á radiación da rapazada nunha escola.

Tendo en conta estas características ao seleccionar e situar as antenas, fíxose a seguinte distribución destas:

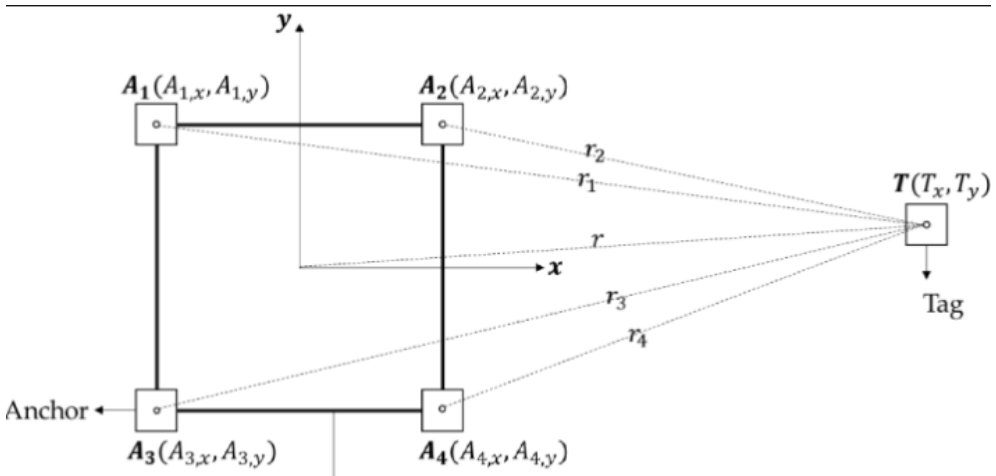


Figura 4. Distribución de antenas e proceso de trilateración para localizar un ou unha estudante pola súa etiqueta

O patrón de radiación das antenas deu os seguintes resultados:

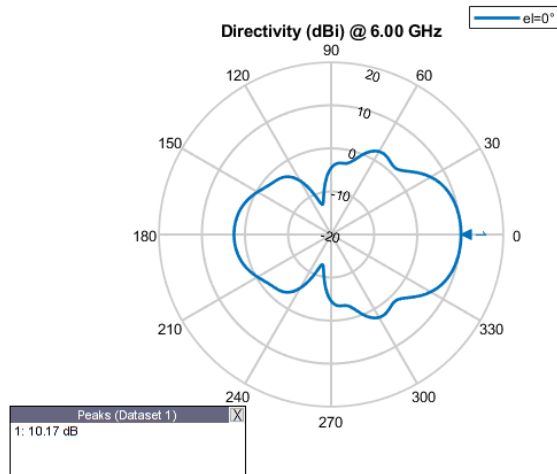


Figura 5. Patrón de radiación das antenas para garantir a triangulación de cada estudante

Un terceiro logro significativo foi desenvolver un sistema con baixas necesidades de batería. As balizas de localización portátiles utilizadas polo estudantado foron deseñadas para funcionar durante case unha semana sen necesidade de recargas. Este logro mellorou a practicidade e a facilidade de uso do sistema, o que asegura unha interrupción mínima das rutinas diarias do estudantado e reducindo a carga de recargas frecuentes.

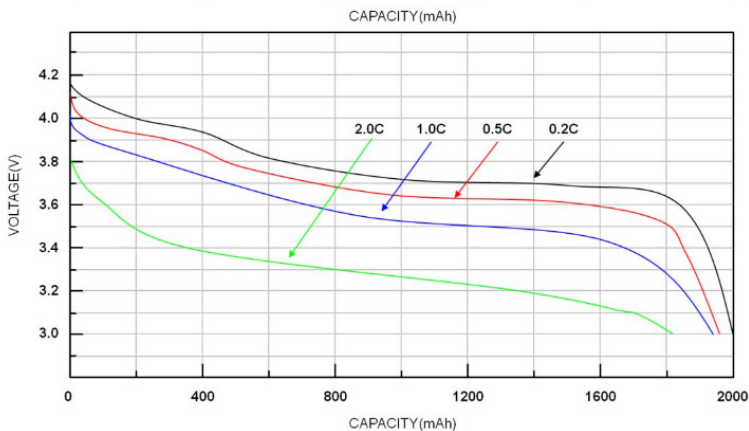


Figura 6. Proceso de descarga das baterías, operando en catro diferentes niveis de carga, segundo o movemento (2 C a 0,2 C, de máis movemento a movemento esporádico e moderado)

O cuarto logro destacado foi a alta precisión dos datos de localización do estudiantado obtidos a través do sistema. A tecnoloxía baseada na UWB demostrou un impresionante nivel de precisión, cunha marxe de erro de 3 a 5 centímetros nunha área que cobre 400 metros cadrados. Este nivel de precisión foi crucial para aplicacións que requirían un seguimento detallado dos movementos do estudiantado dentro de localizacións específicas, o que contribuíu á eficacia xeral do sistema de localización en tempo real.

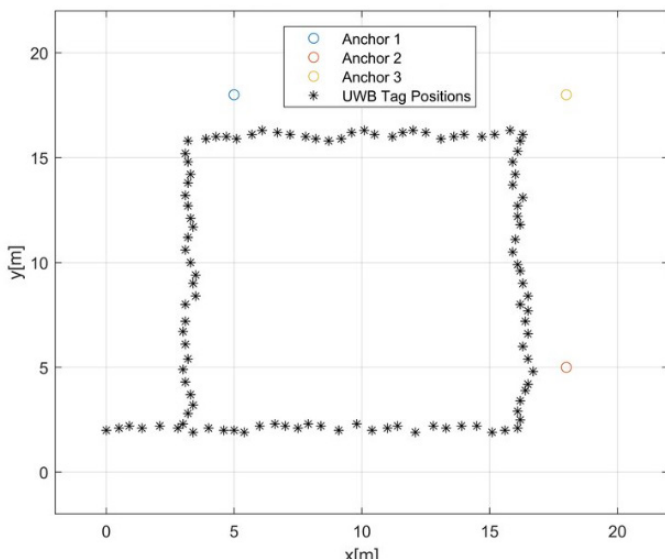


Figura 7. Baixa taxa de erro no posicionamento do sistema. Na imaxe sitúanse tres antenas operativas (das catro dispoñibles) e represéntase o acceso a unha aula cun percorrido cadrado. As deformacións do cadrado reflicten a escasa marxe de erro

O quinto logro centrouse en tratar posibles problemas de interferencia entre os localizadores individuais. O proxecto logrou minimizar as interferencias, o que permitiu a localización simultánea de ata 24 estudantes sen comprometer a precisión ou a confiabilidade do sistema. Este logro foi esencial para a escalabilidade, xa que permitiu que a tecnoloxía se aplicase en contornas educativas máis grandes sen sacrificar a calidade dos datos de localización en tempo real. En xeral, estes cinco logros demostraron colectivamente o éxito do proxecto no desenvolvemento dun sistema avanzado e práctico baseado na UWB para rastrexar o estudiantado dentro dunha contorna escolar.

3 Resultados

A continuación podemos observar o programa desenvolvido para capturar e permitir a análise das evolucións de movemento do estudiantado:

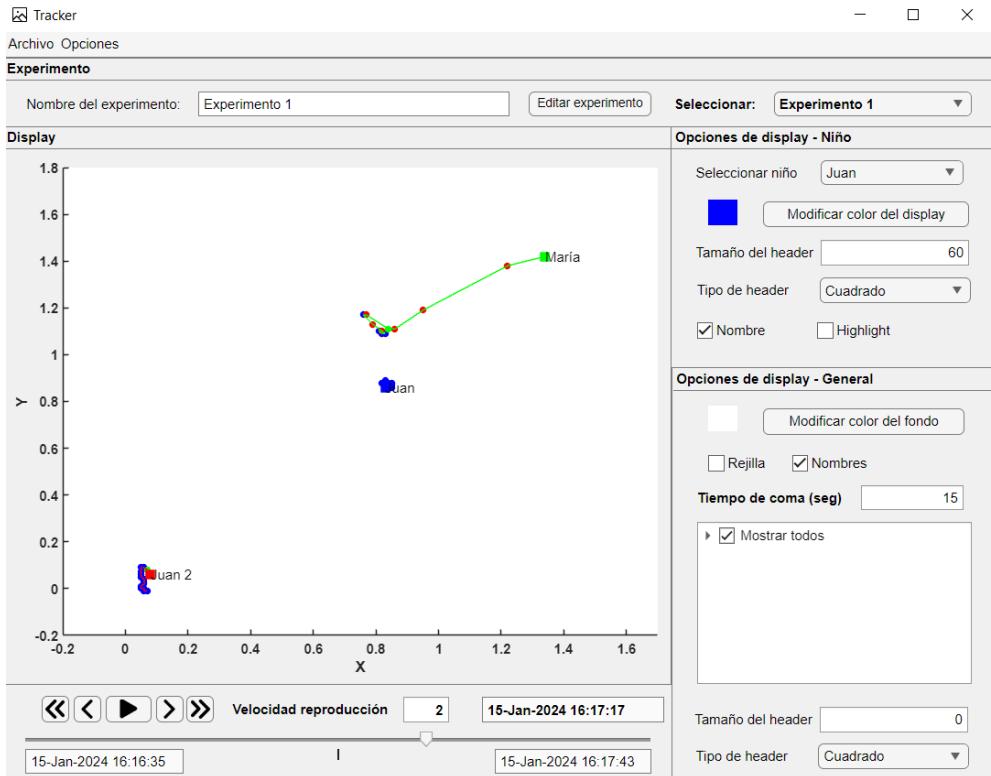


Figura 8. Visualización do software de seguimento das evolucións

Pódense diferenciar os seguintes elementos:

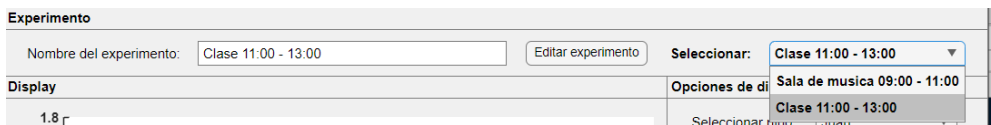


Figura 9. Definición do experimento

Na parte superior, pódense definir diferentes experimentos para ir conseguindo a información ao longo de diferentes aulas, cursos, horas e grupos. Deste xeito, o sistema poder ter diferente información ao longo do tempo e consúltala a posteriori.

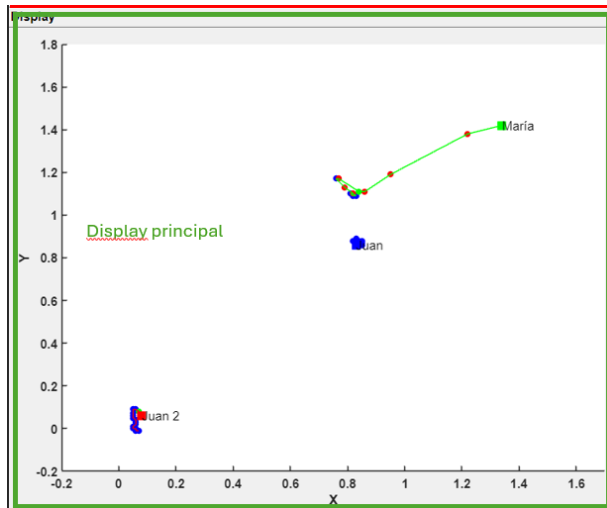


Figura 10. Pantalla principal da localización do alumnado

No panel principal, obsérvase a localización de cada unha das etiquetas (alumnado) ao longo dun experimento concreto.

Na sección de opcións gráficas da aplicación principal podemos seleccionar a que estudante se lle aplicarán estas opcións e diferentes opcións de visualización:

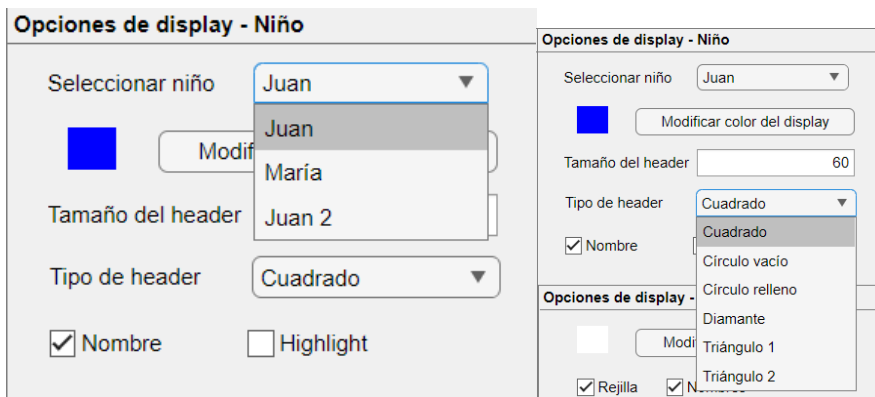


Figura 11. Opcións de visualización

Nas opcións xerais de visualización podemos modificar a visualización da ventá:

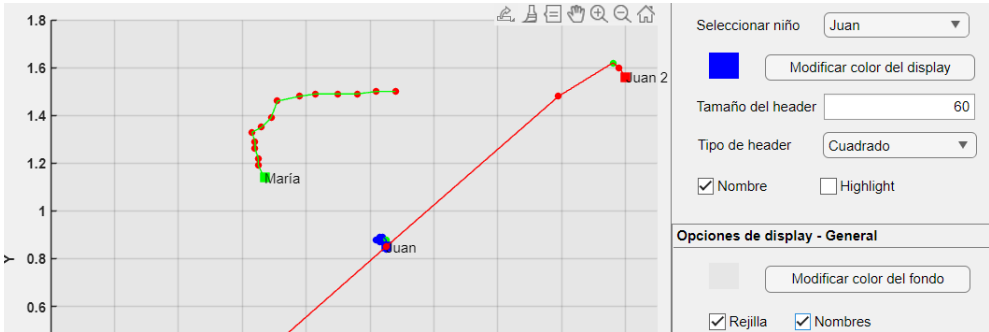


Figura 12. Opcións da ventá

Podemos definir o tempo polo cal se mantén debuxada a traxectoria das etiquetas:

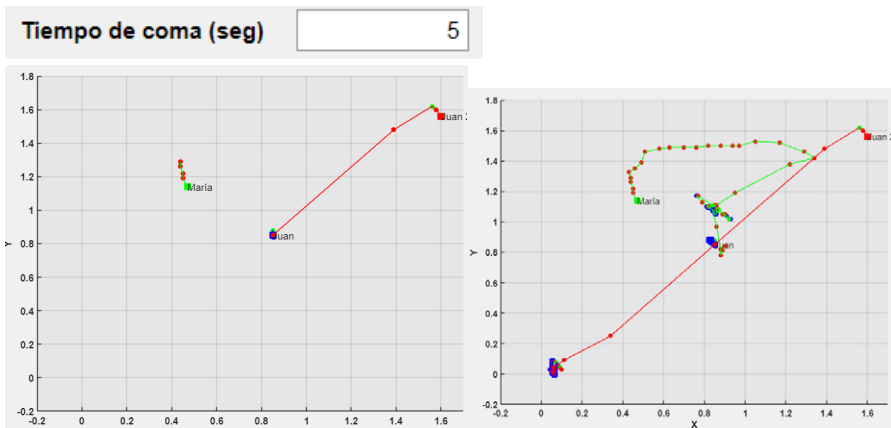


Figura 13. Opcións de cola

Podemos saltar a outro punto da visualización e modificar a velocidade de reprodución coma en calquera reprodutor de vídeo. A velocidade de reprodución é un multiplicador positivo con respecto ao tempo real.

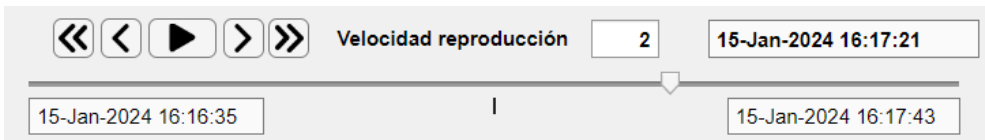


Figura 14. Opcións de tempo

Podemos elixir que etiquetas mostrar:

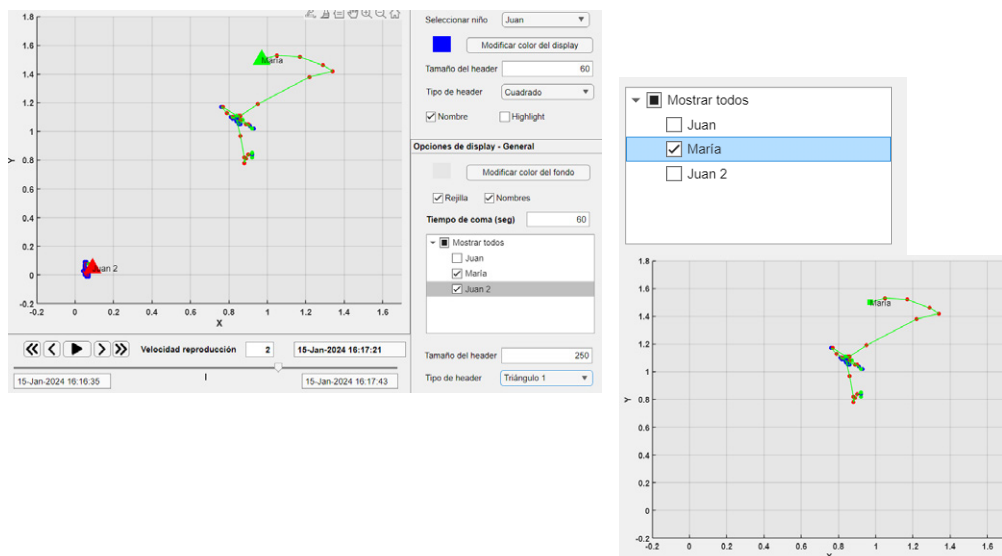


Figura 15. Selección de etiquetas

4 Conclusións

O sistema demostrou as súas capacidades para obter a localización do alumnado en tempo real, cun sinxelo dispositivo que se pode gardar no peto ou en calquera peza de roupa. As capacidades de localización, ademais, foron complementadas con diferentes capacidades de visualización para poder facer unha axeitada explotación da información.

5 Referencias

- [1] Piek, J. P., Dawson, L., Smith, L. M., & Gasson, N. (2008). The role of early fine and gross motor development on later motor and cognitive ability. *Human movement science*, 27(5), 668-681.
- [2] Tremblay, M. S., Chaput, J. P., Adamo, K. B., Aubert, S., Barnes, J. D., Choquette, L., ... & Carson, V. (2017). Canadian 24-hour movement guidelines for the early years (0–4 years): an integration of physical activity, sedentary behaviour, and sleep. *BMC public health*, 17, 1-32.
- [3] Carter, B., Strawbridge, R., Husain, M. I., Jones, B. D., Short, R., Cleare, A. J., ... & Young, A. H. (2020). Relative effectiveness of augmentation treatments for treatment-resistant depression: a systematic review and network meta-analysis. *International Review of Psychiatry*, 32(5-6), 477-490.
- [4] Kshetrimayum, R. S. (2009). An introduction to UWB communication systems. *Ieee Potentials*, 28(2), 9-13.

Mostaza máis ca un mollo. Compostos bioactivos e a súa repercusión na saúde

M. Figueiredo-González,^{1,2,3*} P. Reboredo-Rodríguez,^{1,2,3}
C. González-Barreiro,^{1,2,3} B. Cancho-Grande,^{1,2,3} J. M. Domínguez⁴ e A. Paz^{4*}

¹*Food and Health Omics. Departamento de Química Analítica e Alimentaria.*

Facultade de Ciencias. Campus de Ourense. Universidade de Vigo

²*Instituto de Agroecoloxía e Alimentación (IAA). Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

³*Instituto de Investigación Sanitaria Galicia Sur (IIS Galicia Sur). Sergas. Universidade de Vigo*

⁴*Bioteconoloxía Industrial e Enxeñaría Ambiental (BiotecnIA)*

Departamento de Enxeñaría Química. Campus de Ourense. Universidade de Vigo

aliperez@uvigo.gal; mariafigueiredo@uvigo.gal; preboredo@uvigo.gal;

cargb@uvigo.gal; bcancho@uvigo.gal; jmanuel@uvigo.gal

Resumo

O uso de plantas medicinais como terapia complementaria ou alternativa á medicina convencional é frecuente en todo o mundo, e preto do 80 % da poboación mundial prefíreas como primeira opción de tratamento. Este interese polos produtos naturais está ligado á procura de alimentos funcionais que poidan tratar enfermidades de forma segura e eficaz, impulsando a investigación de fontes naturais de compostos bioactivos. En Galicia, o uso de herbas medicinais sempre estivo arraigado na cultura popular, transmitíndose oralmente ao longo das xeracións. Aínda que a eficacia destas herbas non está cientificamente probada, en moitos casos, os seus compoñentes químicos poden inducir respostas beneficiosas, ofrecendo pistas para o descubrimento de medicamentos eficaces. Un exemplo destas plantas é a mostaza,

utilizada tradicionalmente na medicina popular para tratar enfermidades como as cardiovasculares e a diabetes mellitus. Neste senso, as sementes da mostaza son ricas en nutrientes, incluíndo ácidos graxos omega-3, vitaminas e compostos fenólicos, que teñen propiedades antioxidantes e potencial neuroprotector. Ademais, os compostos fenólicos tales como os ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos, e os compostos non flavonoides, están asociados a unha variedade de actividades biolóxicas, incluídas a actividade antimicrobiana e a inhibición de enzimas relacionadas coa enfermidade de Alzheimer. Tamén esperta interese o seu alto contido en lípidos ricos en ácidos graxos monoinsaturados, e que están estreitamente relacionados coa saúde cardiovascular. Diferentes estudos suxiren que o aceite de mostaza pode usarse como ingrediente funcional nas dietas e mesmo como axente antimicrobiano nos alimentos. Por iso, este estudo pretende analizar a composición química das sementes de mostaza e do seu aceite, especialmente os compostos fenólicos, avaliar a súa actividade neuroprotectora e investigar a posibilidade de obter novos compostos antimicrobianos. Esta investigación pode proporcionar información valiosa sobre o uso potencial da mostaza na industria alimentaria e farmacéutica.

Palabras clave: mostaza, *Sinapis alba*, neuroprotección, antimicrobiano e ingrediente funcional

1 Introducción

Actualmente, un tema que esperta grande interese é a procura de alimentos funcionais que se poidan incorporar á dieta para o tratamento de diversas patoloxías, ou como novas fontes de inhibidores enzimáticos que sexan efectivos, seguros e con menos efectos secundarios ca os fármacos usados ata o momento [1, 2]. Ademais, o incremento da resistencia de certos microorganismos patóxenos aos fármacos actuais, fai que a procura de novos antibióticos sexa un área de gran relevancia [3, 4]. Asemade, segundo a Organización Mundial da Saúde, ao redor do 80 % da poboación mundial prefire utilizar materiais herbarios como primeira opción para o tratamento de enfermidades, transformando o consumo destas especies nunha terapia complementaria ou alternativa no tratamento dunha enfermidade [5]. Todo isto fai

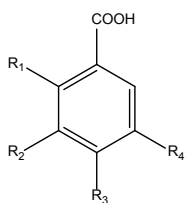
que a busca de novas fontes naturais de compostos bioactivos sexa demandado por estamentos sociais e gubernamentais, e é unha liña prioritaria de acción dentro de plans autonómicos e estatais [6].

Dende a antigüidade, a humanidade recorreu ao uso das herbas para tratar diversas enfermidades. En Galicia, o emprego de remedios ou herbas crúas sempre estivo moi arraigado na cultura popular. A súa elevada dispoñibilidade e a escaseza de médicos nas áreas rurais fixo que as propiedades das plantas se transmitisen oralmente ao longo de xeracións. Aínda que a eficacia e os mecanismos de acción destas herbas non están probados cientificamente, na maioría dos casos estas preparacións inducen a respostas beneficiosas grazas aos seus compoñentes químicos activos, que ofrecen ademais indicios para descubrir medicamentos valiosos de grande eficacia [7]. Deste xeito, a exploración de herbas tradicionais ou condimentos como nova fonte de compostos farmacolóxicos é un campo de gran relevancia. Un exemplo é a planta da mostaza, cuxas sementes se empregan como condimento, conservantes ou na elaboración de vexetais fermentados ou conservados en vinagre, pero de xeito menos coñecido tamén se incorpora a receitas medicinais tradicionais para o tratamento de doenzas como enfermidades cardiovasculares ou a diabetes mellitus [8-10].

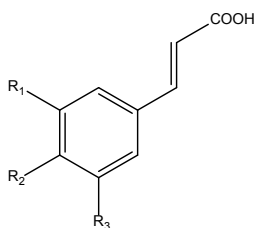
Existen tres especies predominantes de mostaza: *Sinapis alba* (mostaza branca ou amarela), *Brassica juncea* (mostaza castaña ou oriental) e *Brassica nigra* (mostaza negra). Estas especies pertencen ao xénero *Brassica*, no cal se inclúen hortalizas e sementes tales como a coliflor, o brócoli, a col e o nabo, entre outras. As plantas deste xénero son coñecidas por ser fontes de vitamina C, glucosinolatos, flavonoides, carotenoides e tocoferois [11]. Ademais destas propiedades, as sementes de mostaza teñen un alto valor nutricional debido a que son ricas en minerais, ácidos graxos omega-3, aceites esenciais, vitaminas B e E, ácido ascórbico, fenois e fibra dietética [9, 10]. A pesar da rica composición en compostos da semente de mostaza, os estudos recompilados na bibliografía enfócanse principalmente na identificación dos isotiocianatos e glucosinolatos, compostos responsables do sabor picante [7], e son escasas as referencias en canto ao estudo da composición fenólica e a súa aplicación.

Os fenois son metabolitos secundarios das plantas presentes de forma natural nos tecidos vexetais e son os segundos compostos orgánicos máis abundantes no reino vexetal tras a celulosa [12]. A súa estrutura constituída por un anel aromático unido a polo menos un grupo hidroxilo permite clasificar os compostos fenólicos de orixe

vetetal en: non flavonoides e flavonoides. Segundo as referencias bibliográficas, a mostaza conta cunha diversidade de compostos fenólicos, nos que se inclúen os ácidos fenólicos (gálico, *p*-hidroxibenzoico, protocatéquico, vanílico, sirínxico), ácidos hidroxicinámicos (cafeico, *p*-cumárico, ferúlico) [9, 13], flavan-3-ols (catequina e epicatequina) [7] e flavonóis (kaempferol, quercetina, miricetina) [13]. A estrutura química dos principais compostos fenólicos presentes na semente da planta da mostaza, recóllense na figura 1.

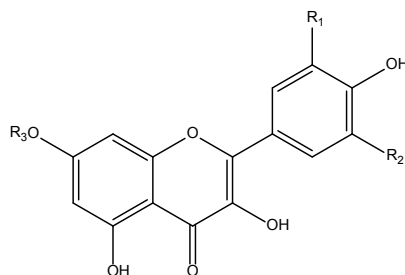


Ácidos hidroxibenzoicos	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Ácido <i>p</i> -hidroxibenzoico	H	H	OH	H
Ácido vanílico	H	OCH ₃	OH	H
Ácido sirínxico	H	OCH ₃	OH	OCH ₃
Ácido salicílico	OH	H	H	H



Ácidos hidroxicinámicos	R ₁	R ₂	R ₃
Ácido sinápico	OCH ₃	OH	OCH ₃
Ácido cafeico	OH	OH	H
Ácido <i>p</i> -cumárico	H	OH	H
Ácido ferúlico	OCH ₃	OH	H

Flavonóis	R ₁	R ₂	R ₃
Miricetina	OH	OH	H
Quercetina	OH	H	H
Kaempferol	H	H	H
Kaempferol- <i>O</i> -hexósido	H	H	Glu



Flavonas	R ₁	R ₂	R ₃
Luteolina	OH	OH	H
Luteolina- <i>O</i> -hexósido	OH	OH	Glu
Apixenina	H	OH	H

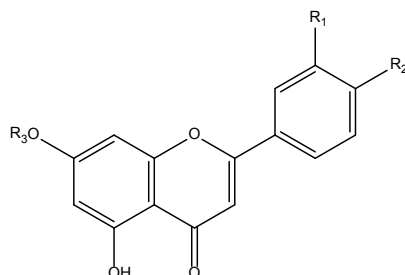


Figura 1. Estructuras dos principais compostos fenólicos determinados nas sementes de *Sinapis alba*

A relevancia dos isotiocianatos e glucosinolatos provén da súa vinculación a diversas actividades biolóxicas, tales como a antimicrobiana, a antibacteriana, a antidiabética ou a anticancerixena [7]. Non obstante, a fracción menos explorada da mostaza, como son os fenois, tamén posúen estas propiedades dende un punto de vista bibliográfico. Neste senso, é coñecido que unha dieta rica en compostos fenólicos se asocia cun menor risco de desenvolvemento dalgúns eventos dexenerativos crónicos baseados en procesos inflamatorios, enfermidades cardiovasculares, diabetes mellitus e algúns tumores causados polo estrés oxidativo [13,14]. Tamén existen referencias sobre algúns compostos fenólicos, presentes de forma natural nos tecidos vexetais, capaces de inhibir as enzimas colinesterasas relacionadas con trastornos neurodexenerativos, como a enfermidade de Alzheimer (EA), que constitúe máis do 60-80 % dos casos de demencia detectados e é a cuarta causa principal de morte no mundo [15, 16]. Segundo a hipótese colinérxica, uns niveis altos das enzimas acetilcolinesterasa (AChE) e butirilcolinesterasa (BuChE) conducen a menores cantidades do neurotransmisor acetilcolina (ACh). Polo que unha vía de tratamento útil fronte á EA e a outros trastornos neurodexenerativos consistiría en reestablecer os niveis de ACh, inhibindo estas enzimas mediante o uso de compostos fenólicos [17].

Outra característica de interese da planta da mostaza é o seu elevado contido en lípidos ricos en ácidos graxos monoinsaturados. Este tipo de ácidos graxos son recoñecidos polo seu efecto beneficioso sobre as enfermidades cardiovasculares [18]. Polo tanto, tamén é de interese explorar a súa composición co obxectivo de avaliar o seu potencial como ingrediente funcional en dietas. Ademais, existen algúns estudos que propoñen a incorporación destes aceites a certos alimentos para evitar o crecemento de microorganismos indesexables e alongar a súa vida útil. Un exemplo é o traballo de Peng *et al.*, [19] no que fan microcápsulas co aceite esencial extraído de sementes de mostaza e determinan a súa actividade antimicrobiana contra os microorganismos patóxenos da industria alimentaria. Outro exemplo é a obtención de antimicrobianos mediante a combinación do aceite das sementes con outros compostos como o carvacrol [20], ou a fabricación de films antimicrobianos activada por humidade que contén sementes de mostaza moídas [21]. Porén, son poucas as referencias nas que estudan a extracción de compostos antimicrobianos fronte a patóxenos resistentes a antibióticos que causen doenzas en humanos.

Por todo o exposto, o obxectivo deste proxecto INOU foi estudar a funcionalidade da semente e do seu aceite esencial, avaliando de forma pormenorizada a composición química, prestando especial atención á composición fenólica, a actividade neuroprotectora fronte a enzimas clave relacionadas coa enfermidade de Alzheimer e a posibilidade de obter novos compostos antimicrobianos que fagan fronte ás infeccións causadas por patóxenos superresistentes.

2 Materiais e métodos

2.1. Obtención e caracterización química das sementes e follas de *Sinapis alba*

2.1.1 Cultivo e recollida das sementes e follas da planta da mostaza

As sementes da mostaza procedentes de agricultura ecolóxica foron mercadas en La Montoliva-Agricultura Ecolóxica (Vilallonga del Camp, Tarragona, España), mentres que o substrato de cultivo pertence á casa comercial Ecocelta (Ponteareas, Galicia, España) e posuía as seguintes características: nitróxeno (900 mg L⁻¹); fósforo (720 mg L⁻¹); potasio (1000 mg L⁻¹); materia orgánica (> 40 %); condutividade eléctrica (<3 mS/cm); pH (6-8) e densidade aparente (0,16 kg L⁻¹). O cultivo fíxose en macetas de 1 litro, nas que se sementaron entre catro e seis sementes, e deixáronse nunha cámara termostática que xestiona o Instituto de Agroecoloxía e Alimentación no campus de Ourense. Isto permitiu o control da temperatura a 20 ± 2 °C e 60 % de humidade cun fotoperíodo de 16 horas de luz e 8 horas de escuridade ao longo de todo o crecemento da planta. Diariamente comprobouse o seu estado hídrico, regando cando a terra se vía seca. Ao finalizar o cultivo, as follas foron recollidas e deshidratadas mediante un liofilizador Labconco con bomba IImvac, e as sementes recollidas do interior das vaíñas.

2.1.2. Caracterización das sementes e das follas da planta da mostaza

A caracterización das sementes e das follas levouse a cabo mediante métodos oficiais. Os polisacáridos (celulosa, hemicelulosa e lignina) determináronse mediante hidrólise ácida cuantitativa segundo o método oficial NREL/TP-510-42618 [22]. O contido de humidade determinouse secando a biomasa ata peso constante a 105 °C,

mentres que o contido en cinzas se fixo calcinando as mostras nun forno de mufla a 550 °C durante 6 horas. Cuantificáronse os extractos usando un extractor Soxhlet e etanol e auga como solventes, recirculando un tempo máximo de 24 horas [23]. Unha vez recuperados, empregouse o método de detección de azucres redutores mediante o ácido dinitrosalicílico (DNS) [24] para coñecer os azucres totais e o método de Folin-Ciocalteu [25] para determinar os fenóis totais.

2.2. Extracción dos compostos fenólicos da semente de *Sinapis alba*

A extracción dos compostos fenólicos realizouse seguindo o protocolo proposto por Martinović *et al.*, [8] con lixeiras modificacións. Mesturáronse 2,0 g de semente desengraxada en po con metanol, acetona e auga (7:7:6, v/v) en proporción 2:10 (p/v) e a mestura extraeuse nun axitador horizontal ao abrigo da luz durante 6 horas. Unha vez transcorrido o tempo, o extracto centrifugouse (9000 rpm, 5 min, 4 °C) e separouse o sobrenadante (fracción 1). Sobre o residuo sólido engadíronse 10 mL do disolvente anterior e levouse a cabo unha extracción asistida por ultrasóns durante 45 minutos. Logo centrifugouse (9000 rpm, 5 min, 4 °C) e separouse o sobrenadante (fracción 2). Por último, de novo sobre o residuo sólido repetiuse unha nova extracción asistida por ultrasóns seguindo o mesmo proceso anterior e xerouse a fracción 3. As tres fraccións foron combinadas e transferidas a un funil de decantación que contiña o mesmo volume dunha mestura de éter dietílico e acetato de etilo 1:1 (v/v) para realizar unha extracción líquido-líquido (3 veces). Finalmente, os tres extractos foron combinados e concentráronse ao baleiro mediante un evaporador rotatorio ata a sequidade. Despois, algúns extractos disolvéronse en MeOH, filtráronse a través de filtros de PET 20/25 0,20 µm e almacenáronse en conxelación a -20 °C antes da súa análise cromatográfica. Outros extractos disolvéronse nos tampóns fosfatos para determinar a súa funcionalidade a través de tests enzimáticos.

2.3. Obtención do aceite de *Sinapis alba* e extracción dos seus compostos fenólicos

A recuperación dos aceites a partir da semente fíxose mediante unha extracción sólido-líquido con etanol nun Soxhlet con recircularización durante 6 horas. Unha vez

finalizada a extracción, o solvente evaporouse nun rotavapor Büchi R-215 (Frankfurt, Alemaña) e cuantificáronse os lípidos mediante gravimetría.

Para a extracción dos compostos fenólicos a partir do aceite extraído da semente da mostaza seguiu-se o protocolo experimental proposto polo Consello Oleícola Internacional [26], con algunhas modificacións: a mostra de aceite (2 g) dissolveuse en *n*-hexano (1 mL) e en metanol e auga (80:20, v/v) (2 mL). A mestura foi vigorosamente axitada nun vórtice durante 3 minutos e centrifugada (8000 rpm, 5 min, 4 °C). A fase metanólica separouse da fase oleosa e o residuo extraeuse dúas veces cunha nova porción de metanol (2 x 2 mL). As diferentes fases orgánicas da extracción xuntáronse, concentráronse e almacenáronse nun conxelador a 0 °C ata a súa posterior análise.

2.4. Preparación dunha infusión a partir das follas da planta da mostaza

Introducíronse dous gramos de folla triturada dentro de bolsas de infusión comerciais e engadíronse 200 mL de auga destilada. Esta mestura ferveuse durante 15 minutos, filtrouse e o líquido resultante liofilizouse.

2.5. Caracterización cromatográfica do perfil fenólico da semente e do aceite de *Sinapis alba*

Para identificar e cuantificar os compostos fenólicos utilizouse un HPLC Agilent modelo 1260 Infinity (Palo Alto, CA, EUA) con detector AB SCIEX Triple Quad 3500 (AB Sciex, Foster City, CA, EUA) equipado cunha fonte de ionización por electrospray (ESI) e unha columna Luna C18 (2 x 150 mm, 3 µm) de Phenomenex (CA, EUA) termostaticada a 40 °C. Estableceuse un fluxo de 300 µL min⁻¹ de fase móbil das seguintes fases móbiles: auga acidificada con ácido fórmico (0,1 %, v/v) (A); acetonitrilo con ácido fórmico (0,1 %, v/v) (B), empregando o seguinte gradiente: 0 min, 95 % (A): 5 % (B); 6 min, 60 % (A): 40 % (B); 7 min, 10 % (A): 90 % (B); 9 min, 10 % (A): 90 % (B); 10 min, 95 % (A): 5 % (B); 17 min, 95 % (A): 5 % (B). O efluente da columna controlouse utilizando o *multi reaction mode* (MRM) en modo negativo, empregando nitróxeno como gas nebulizador. As condicións experimentais para o espectrómetro de masas foron as seguintes: voltaxe de pulverización 4000-5500, temperatura capilar de 400 °C, presión do gas auxiliar de 55 unidades, respectivamente, e enerxía de colisión 7. O software utilizado foi o Analyst 1.6.2 (AB Sciex, Foster City, CA, EUA).

Táboa 1. Identificación de compostos fenólicos por HPLC-ESI-MS/MS

Compostos fenólicos	Pico	tr (min)	Peso molecular (g/mol)	[Ms] ⁺ (m/z)	Fragmentos (m/z)
Ácido cloroxénico	1	6,11	354	353	191
Ácido <i>p</i> -hidroxibenzoico	2	6,24	138	137	93
Ácido salicílico	3	6,25	138	137	93,64
Ácido 2,4 dihidroxicinámico	4	6,44	180	179	179, 135, 91
Ácido cafeico	5	6,61	180	179	135,107
4-vinilsiringol	6	6,61	180	179	180
Ácido vanílico	7	6,68	168	167	108, 122, 151
Ácido sirínxico	8	6,8	198	197	181, 122
Rutina	9	7,14	610	609	299, 270
Ácido <i>p</i> -cumárico	10	7,48	164	163	119, 93, 163, 119
Luteolina- <i>O</i> -hexósido	11	7,71	448	447	285, 151
Ácido sinápico	12	7,74	224	223	163, 192, 148, 121
Ácido ferúlico	13	7,77	194	193	193, 134
Kaempferol- <i>O</i> -hexósido	14	8	448	447	287, 151
Miricetina	15	8,4	318	317	318, 179, 152
Luteolina	16	8,97	286	285	133, 285, 133
Quercetina	17	9,04	302	301	150, 121
Apixenina	18	9,14	270	269	269, 117
Kaempferol	19	9,26	286	285	285, 286, 117

A identificación dos compostos fenólicos determinouse a partir da fragmentación dos ións como se recolle na táboa 1. Construíronse curvas de calibración para 17 estándares disoltos en MeOH en concentración de 100 mg L⁻¹ e con diferentes niveis de concentracións dende 0,024 ata 25 mg L⁻¹. Os compostos dos que non se dispoñía dun estándar comercial foron cuantificados empregando a curva de calibración dun composto derivado; así a luteolina-*O*-hexósido cuantificouse empregando a recta da luteolina e para o kaempferol-*O*-hexósido utilizouse o kaempferol.

2.6. Caracterización cromatográfica do perfil de ácidos graxos do aceite de *Sinapis alba*

Os lípidos obtidos no punto 2.3 sometéronse a un proceso de transesterificación para obter os ácidos graxos metilo éster (FAME) [27,28] baseado na adición dun solvente lixeiramente acidificado e incubando a 60 °C durante 15 minutos. Unha vez transcorrido ese tempo, engadiuse carbonato cálcico para eliminar as moléculas de auga e recolléronse os FAME en *n*-hexano. A identificación dos FAME realizouse mediante cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas (GC-MS), utilizando unha columna Agilent J&W HP-5 Intuvo GC (25 m, 0,20 mm, 0,5 µm), mentres que a cuantificación se realizou mediante un detector de ionización de chama por cromatografía de gases (sistema GC-FID) equipado cunha columna GC capilar Equity 5 (30 m, 0,25 mm, 0,25 µm). As condicións de operación de cromatografía de gases realizáronse segundo Chalima *et al.* [29]. As curvas de calibración dos ácidos graxos detectados realizáronse mediante un estándar FAME Mix (Supelco 37, Sigma-Aldrich, EUA).

2.7. Determinación das actividades bioactivas da semente e dos aceites de *Sinapis alba*

2.7.1. Actividade neuroprotectora. Inhibición de enzimas colinesterasas

A inhibición das enzimas AChE e BuChE foi avaliada segundo a metodoloxía anteriormente descrita [30]. De xeito breve, o extracto disolto en tampón A (50mM Tris-HCl, pH 8) ou só o tampón A (control negativo) foi mesturado, xunto cos substratos de ioduro de acetiltiocolina (ATCI) para a enzima AChE ou ioduro de S-butiriltiocolina (BTCl) para a enzima BuChE. Logo, engadiuse 5,5-ditiobis (ácido 2-nitrobenzoico) (DTNB) e tampón B (50mM Tris-HCl, cun 0,1 % de soro bovino de albumina (BSA), pH 8). A absorbancia mediuse a 405 nm nun LT-5000 MS ELISA Reader (Labtech.com, Palaiseau, Francia). As taxas de reacción foron calculadas despois da adición de AChE (0,44 U mL⁻¹ en tampón B) ou de BuChE (0,1 U mL⁻¹ en tampón B). A concentración dos extractos de semente e aceite variaron desde 62,5 a 1000 µg de extracto seco mL⁻¹ para AChE e desde 15,6 a 1000 µg de extracto seco mL⁻¹ para BuChE.

2.7.2. Actividade antimicrobiana

A determinación da actividade antimicrobiana fíxose fronte a tres microorganismos patóxenos: *Candida albicans* CECT 1200T, *Staphylococcus aureus* CECT 86T e *Staphylococcus epidermis* CECT 232T, procedentes da Colección Española de Cultivo Tipo (CECT). A técnica escollida foi o test de difusión en ágar-ágar [31], empregando como medios de cultivo o ágar-ágar nutritivo (10 g de peptona, 5 g de extracto de lévedo, 5 g de sal e 15 g de ágar-ágar por litro) para as cepas de estafilococos e o ágar-ágar malta (20 g de extracto de malta, 20 g de glicosa, 1 g de peptona vexetal e 15 g de ágar-ágar por litro) para a cándida. Testáronse tres concentracións de patóxenos: 50, 100 e 200 μl de cultivo activo de absorbancia 0,5 pola escala McFarland (aproximadamente 10^8 UFC mL^{-1}) por placa. En cada placa realizáronse sete ocos nos que se depositaron os distintos extractos e deixáronse incubando 24 h a 30 °C. Logo de transcorrer este tempo, medíronse os halos de inhibición (cm).

2.8. Tratamento estatístico

Para a análise estatística empregáronse as ferramentas dispoñibles no programa STATISTICA 13.0 (StatSoft, EUA). Os datos foron sometidos a unha análise de varianza (ANOVA) e os que amosaron diferenzas significativas foron sometidos á proba de Tukey. Esta proba determinou a diferenza entre os valores medios de dous grupos (varianza intragrupo) a un nivel de significación de $p < 0,05$ e utilizáronse nas táboas diferentes letras para etiquetar os valores con diferenzas estatisticamente significativas.

3 Resultados e discusión

3.1. Cultivo e recollida das sementes e das follas da planta da mostaza

A *Sinapis alba*, comunmente coñecida como mostaza branca, é unha planta anual da familia das crucíferas, que xera unhas vaíñas (ou valvas) nas que no interior medran as sementes esféricas de cor parda, caracterizadas polo seu alto contido en lípidos [32]. Segundo as fontes bibliográficas, a mostaza é unha especie caracterizada polo seu rápido crecemento; polo tanto, este proxecto INOU iniciouse co seu cultivo baixo condicións controladas nunha cámara termostática. Diariamente rexistrouse o seu crecemento e o estado hídrico da terra, regando en caso de ser necesario. As primeiras follas das plántulas observáronse aos catro días (figura 2A), tendo un rápido

desenvolvemento en tan só oito días (figura 2B). Aproximadamente un mes despois do inicio do cultivo, observáronse as primeiras inflorescencias (figura 2C) que derivaron en flores dunha intensa cor amarela (figura 2D) e ao mes e medio o talo da planta alcanzou a súa lonxitude máxima (80 cm). Unha vez finalizado o proceso de floración, apreciáronse pequenas follas verdes que foron engrosando ata dar lugar ás vaíñas coas sementes no seu interior (figura 2E). A totalidade deste proceso levou aproximadamente dous meses e medio. A partir deste intre recolléronse tanto as follas verdes coma as amarelas e deixáronse secar as vaíñas que contiñan as sementes (figura 2F).

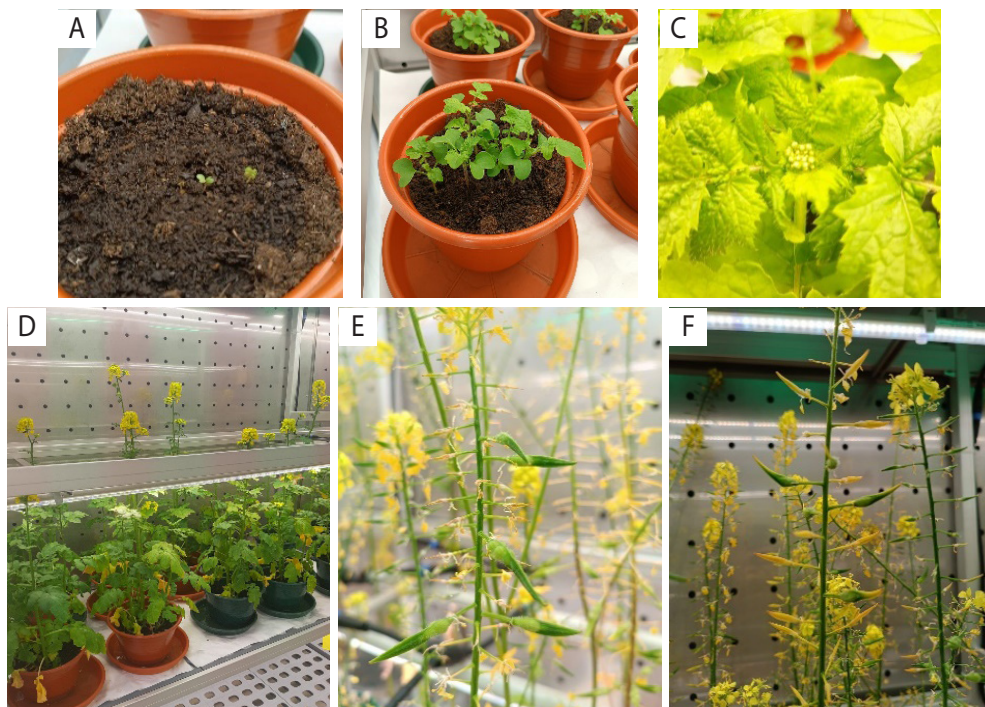


Figura 2. Crecemento da planta da mostaza ao cabo de: (A) catro días; (B) oito días; (C) inicio da floración; (D) un mes; (E) dous meses (aparición das vaíñas verdes que conteñen as sementes); e (F) secado das vaíñas na planta da mostaza

Aínda que o uso máis amplo da semente da mostaza é como condimento de alimentos ou para a elaboración de salsas, o rápido desenvolvemento da planta podería ser unha vantaxe á hora de introduci-lo na agricultura galega. Un exemplo é o seu uso como cobertura vexetal, posto que a súa raíz pivotante permite descomprimir a terra e mellorar a circulación da auga e do aire [32]. Outro exemplo é o seu uso na

biofumigación, técnica de control de patóxenos da terra mediante a incorporación de materia orgánica para alcanzar condicións de anaerobiose. Debido a que esta planta xera elevadas cantidades de biomasa en pouco tempo, é posible o seu uso in situ [33]. Ademais, esta especie contén importantes cantidades de glucosinolatos [34], que ao ser incorporados ao solo hidrólízanse transformándose en compostos tóxicos para nematodos, malas herbas, insectos e patóxenos como o *Verticillium dahliae*, causante da verticilose que afecta gravemente a cultivos como as oliveiras [35] ou a especies de fungos da familia *Cylindrocarpon* responsables do pé negro da vide [36]. Finalmente, a *Sinapis alba* tamén se emprega como fertilizante verde, posto que, a pesar de non xerar nitróxeno, as súas raíces son capaces de absorber sales minerais insolubles e outras substancias das capas de maior profundidade do solo, e remontalas á superficie en forma de biomasa vexetal. Esta biomasa, ao ser rozada, descompoñerese na superficie achegando eses nutrientes. Todo isto avala a relevancia de *Sinapis alba* dende un punto de vista agrícola, fomentando o seu interese en Ourense tendo en conta o incremento nos últimos anos das hectáreas destinadas á agricultura ecolóxica, así como o seu uso no cultivo consolidado dos viñedos ou no cultivo emerxente de oliveiras.

3.2. Caracterización das sementes e das follas da planta da mostaza

Na actualidade o aceite de mostaza é o segundo aceite vexetal máis imporante na India e, unha vez extraído, o residuo resultante rico en proteínas destínase á alimentación animal [37]. Non obstante, son poucas as referencias en canto á caracterización da planta; polo tanto, un dos obxectivos desta investigación foi a caracterización das sementes e das follas para posteriormente determinar as súas aplicacións no eido da saúde.

Na táboa 2 amósanse os resultados obtidos: obsérvase a elevada composición de elementos non estruturais da semente moída cun $62,28 \pm 0,90$ % de extractos, fronte aos $18,49 \pm 0,31$ % e $23,30 \pm 0,05$ % das follas verdes e amarelas, respectivamente. Estes resultados era esperables debido a que as sementes son as estruturas con función reprodutiva da planta, polo que conteñen grandes cantidades de nutrientes para o embrión, neste caso os lípidos. O concepto «extractos» abrangue non só os lípidos presentes, senón tamén outros compostos non estruturais como pigmentos, ceras, pectinas, fenóis libres, azucres etc. Sen embargo, a complexidade desta mestura imposibilitou a posterior cuantificación destes compostos de xeito individualizado, e

para a súa determinación foron necesarios levar a cabo outros procedementos máis selectivos.

Táboa 2. Composición química (expresado en %) da semente e das follas de *Sinapis alba*

	Semente	Follas verdes	Follas amarelas
Humidade	5,87 ± 0,18 ^a	1,56 ± 0,19 ^b	2,16 ± 0,28 ^b
Cinzas	7,04 ± 0,47 ^a	9,99 ± 0,02 ^b	16,66 ± 0,56 ^c
Extractos	62,28 ± 0,90 ^a	18,49 ± 0,31 ^b	23,30 ± 0,05 ^c
Lignina soluble	5,88 ± 0,11 ^a	2,20 ± 0,10 ^b	1,99 ± 0,08 ^b
Lignina insoluble	5,78 ± 0,25 ^a	4,44 ± 0,53 ^a	5,98 ± 0,66 ^a
Hidratos de carbono			
Glucano	8,09 ± 0,16 ^a	46,71 ± 0,10 ^b	34,73 ± 1,34 ^c
Xilano	5,36 ± 0,33 ^a	12,45 ± 1,11 ^b	11,23 ± 0,01 ^b
Arabano	3,30 ± 0,40 ^a	2,63 ± 0,59 ^a	2,77 ± 0,1 ^a
Acetilo	nd	nd	nd

nd: non detectado

Na táboa 3 amósanse os resultados obtidos para os pigmentos. As follas, responsables de levar a cabo a fotosíntese e a respiración, foron as que posuiron un maior contido en antocianinas, carotenoides e clorofilas, así coma en compoñentes estruturais, como é a celulosa (glucano) e hemicelulosa (xilano e arabano) (táboa 2). Especificamente, as follas verdes amosaron ser ricas en clorofilas, mentres que durante o proceso de senescencia o seu contido viuse reducido (follas amarelas). Non obstante, en ambas as follas mantense o seu contido en antocianinas e carotenoides. Estas tres clases de pigmentos son de gran relevancia industrial, xa que se empregan como colorantes, indicadores de adulteración alimentaria e tamén para potenciar beneficios para a saúde. Na industria alimentaria son tendencia a mellora da seguridade, o valor nutricional e as propiedades sensoriais, polo que a utilización de pigmentos que teñan propiedades bioactivas teñen unha gran relevancia [38].

Táboa 3. Contido en pigmentos (expresado en mg g⁻¹) da semente e das follas de *Sinapis alba*

	Semente	Follas verdes	Follas amarelas
Antocianinas	0,39 ± 0,00 ^a	0,51 ± 0,01 ^b	0,60 ± 0,11 ^b
Carotenoides	nd	1,26 ± 0,02 ^a	1,15 ± 0,1 ^a
Clorofila A	nd	3,59 ± 0,06 ^a	0,40 ± 0,00 ^b
Clorofila B	nd	1,33 ± 0,04 ^a	0,18 ± 0,00 ^b

nd: non detectado

3.3. Obtención de lípidos a partir da semente

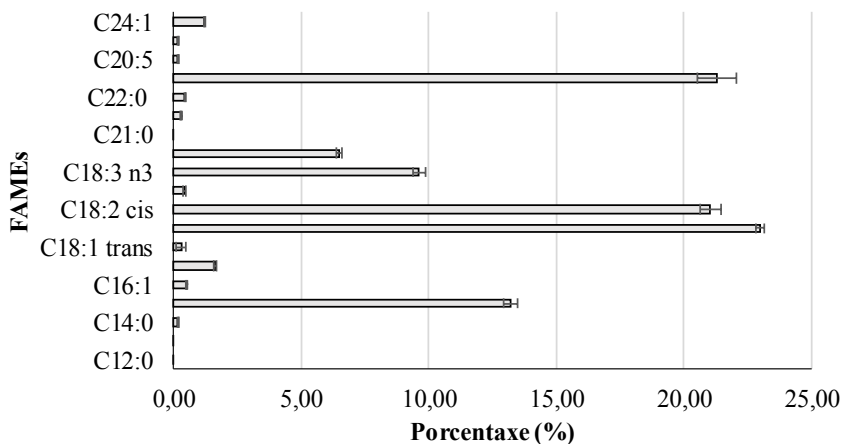
A recuperación dos lípidos a partir da semente fíxose mediante o método Soxhlet empregando etanol como solvente. Este tipo de extracción sólido-líquido é axeitado para mostras que conteñan pouca auga, xa que o mecanismo de extracción dos lípidos é por difusión e a presenza de auga reduce o contacto dos lípidos co solvente [39]. A pesar de que o solvente máis empregado é o *n*-hexano, neste proxecto INOU seleccionouse o etanol por considerarse un solvente verde, que non emite compostos orgánicos volátiles á atmosfera, e que é facilmente recuperado. A porcentaxe de lípidos obtidos mediante este procedemento foi dun 43,33 ± 2,34 %. Este valor foi o dobre do indicado na etiqueta da información nutricional das sementes mercadas. Unha posible xustificación destes datos ven dada pola menor selectividade do etanol polos triglicéridos, de xeito que durante a extracción tamén se arrastran outros compostos como fosfatos, fenois, pigmentos e azucres solubles. Porén, unha vez que a fracción oleica arrefría, parte do material extraído fíxose insoluble en etanol (figura 3A), depositándose no fondo e separándose os lípidos (figura 3B) do resto dos compostos [40].



Figura 3. (A) Lípidos extraídos da *Sinapis alba* con etanol mediante Soxhlet ao arrefriar e (B) lípidos recuperados

Unha vez extraídos e cuantificados os lípidos mediante gravimetría, levouse a cabo a transesterificación dos ácidos graxos en metil éster (FAME). Tal e como se observa na figura 4A, os compostos maioritarios foron o ácido palmítico (C16:0), oleico (C18:1 cis), linoleico (C18:2 cis) e o araquidónico (C20:4). Non obstante, esta porcentaxe foi relativa ás áreas detectadas e na figura 4B indícase a concentración de cada FAME acorde ao límite de detección do equipo empregado. Deste xeito, os compostos maioritarios (>50 mg g⁻¹) foron o ácido oleico, linoleico e araquidónico, é dicir, o aceite da semente posúe unha rica composición en omega 9 e 6.

A.



B.

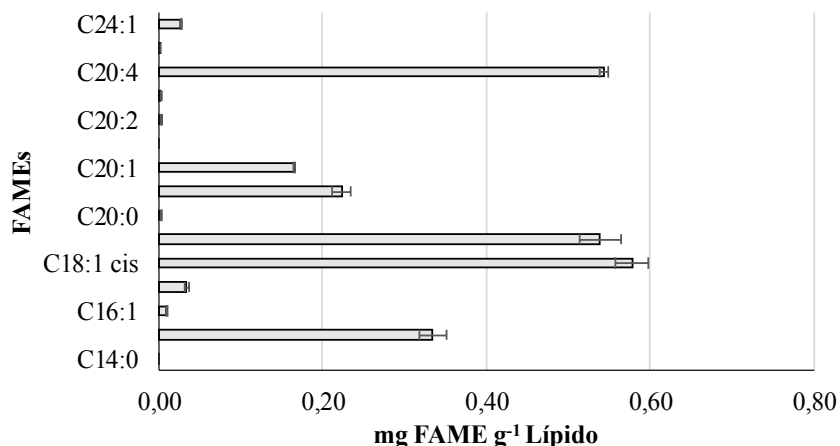


Figura 4. Perfil de ácidos graxos extraídos da semente de *Sinapis alba* mediante o procedemento Soxhlet empregando etanol como solvente en (A) porcentaxe relativa á área e (B) concentración de FAME por gramo de lípido extraído

3.4. Determinación do perfil fenólico da semente e do aceite de *Sinapis alba*

O potencial bioactivo da semente de mostaza pódese estimar a través da identificación de compostos fenólicos recoñecidos por posuír propiedades beneficiosas para a saúde, como a capacidade para combater o estrés oxidativo, previr o cancro, actuar contra microorganismos daniños, reducir a mutaxénese e combater a inflamación [41]. Ademais, a avaliación do contido fenólico dos aceites extraídos a partir de sementes, neste caso a mostaza, son indicadores da calidade do aceite porque protexen os lípidos da peroxidación e son responsables da súa capacidade eliminadora de radicais libres [42]. Para levar a cabo a identificación individual dos compostos fenólicos das sementes e do aceite de mostaza, unha vez optimizadas as condicións cromatográficas descritas na sección de materiais e métodos, lograronse identificar un total de 17 compostos fenólicos para a semente e 15 para o aceite, incluíndo non flavonoides (ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos) e flavonoides (flavonois e flavonas). Na táboa 4 recóllense a concentración de todos os compostos fenólicos na semente e no aceite de *Sinapis alba*.

Os ácidos fenólicos nas plantas poden existir en forma libre ou ligada, tanto solubles (ésteres ou conxugados) coma insolubles. As formas conxugadas están unidas principalmente a oligosacáridos. Neste traballo, segundo o protocolo de extracción empregado, determináronse os fenóis libres tanto na semente coma no seu aceite correspondente. Co obxectivo de mellorar a comprensión dos resultados, os fenóis agrupáronse nas seguintes familias:

- **Ácidos hidroxibenzoicos.** Na semente de *Sinapis alba* foron identificados os ácidos *p*-hidroxibenzoico, salicílico, vanílico e sirínxico. Son maioritarios os dous primeiros, cunhas concentracións moi próximas ($6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ e $6,5 \text{ mg kg}^{-1}$), e representan unha porcentaxe do 13,4 % e do 13,5 %, respectivamente, do total de compostos fenólicos identificados. Comparativamente con outro traballo atopado na bibliografía, a concentración obtida para o ácido *p*-hidroxibenzoico en sementes de mostaza da mesma variedade foi menor ($80,53 \text{ mg kg}^{-1}$) [8]. Isto pode ser debido a factores agronómicos, ambientais, edáficos e tecnolóxicos, que condicionan o perfil fenólico das plantas da mesma variedade [43, 44]. Ao igual ca os factores ambientais, o xenotipo xoga un papel importante na composición fenólica das plantas ata o punto de que se poden empregar como marcadores para a identificación de variedades; por

exemplo, o contido dos ácidos *p*-hidroxibenzoico e salicílico no farelo de sementes desengraxadas da variedade *Sinapis alba* mostraron unha concentración de 22,13 e 6,70 mg kg⁻¹, respectivamente; mentres que para a variedade *Brassica juncea* (tamén coñecida como mostaza oriental) exhibiron un contido de 2,84 e 2,56 mg kg⁻¹, respectivamente [10].

En canto á concentración dos ácidos hidroxibenzoicos no aceite, esta foi lixeiramente superior á concentración atopada na semente. Non obstante, mantívose a mesma abundancia dos compostos de acordo coa secuencia ácido hidroxibenzoico ≈ ácido salicílico > ácido vanílico > ácido sirínxico.

- **Ácidos hidroxicinámicos.** Tal e como se pode observar na táboa 4, o composto máis abundante foi o ácido sinápico tanto para a semente (22 mg kg⁻¹) coma para o aceite (26 mg kg⁻¹). Este contido foi similar ao encontrado para o farelo de semente de mostaza *Sinapis alba* (32 mg kg⁻¹) [10], pero foi elevado (6,12 mg kg⁻¹) [8] ou moi baixo (150 mg kg⁻¹) [45] comparado con outras sementes de mostaza moídas. Neste traballo, a porcentaxe obtida da concentración de ácido sinápico na semente con respecto aos compostos fenólicos totais é do 46 %, unha cantidade moito menor ca a atopada nunha investigación de Shahidi e Naczki [46], os cales informaron de que o ácido sinápico representa un 85 % dos ácidos fenólicos libres en sementes de mostaza. Ademais, Engels *et al.* [47] informaron da presenza de varios conxugados de ácido sinápico en metanol acidificado ou extractos de acetona de sementes de mostaza oriental (*Brassica juncea*), o que pon a importancia de que o uso de diferentes solventes e métodos de extracción condicionan en gran medida o perfil fenólico da planta da mostaza [48].

O ácido ferúlico foi o segundo composto maioritario dos ácidos hidroxicinámicos cunha concentración de 0,98 mg kg⁻¹ para a semente e de 1,08 mg kg⁻¹ para o aceite. Isto está en concordancia cun traballo de Nicácio *et al.* [13], os cales informaron de que o ácido ferúlico está presente nunha elevada concentración nesta variedade de mostaza (2,74 mg kg⁻¹) comparado con outras variedades de mostaza como son a castaña ou a negra. Cunha concentración inferior, tamén foron cuantificados os ácidos cafeico, *p*-cumárico e 2,4-dihidroxicinámico na semente e no aceite de *Sinapis alba*. Polo contrario, o ácido cloroxénico, que é o éster do ácido cafeico e o ácido quínico, unicamente se detectou en semente.

Finalmente, o 4-vinilsiringol amosou concentracións de $1,91 \text{ mg kg}^{-1}$ e $0,74 \text{ mg kg}^{-1}$ para a semente e o aceite, respectivamente. Nun traballo previo realizado xa se informou da presenza deste composto na semente de mostaza e, aínda que o seu mecanismo de formación non está claro, algúns estudos indican que se pode orixinar pola descarboxilación enzimática ou térmica do ácido sinápico[49].

- **Flavonois.** Os flavonois como a quercetina e o kaempferol son característicos en plantas de *Brassica* e atópanse comunmente como formas de *O*-glucósidos [50]. De feito, na semente o flavonol maioritario foi o kaempferol-*O*-hexósido ($3,34 \text{ mg kg}^{-1}$). Este flavonol tamén foi o máis abundante encontrado en farelo de *Sinapis alba* cunha concentración de $1,51 \text{ mg kg}^{-1}$ [10]. Tamén foron encontrados outros flavonois non glucosilados, aínda que en menor concentracións como o kaempferol ($0,01 \text{ mg kg}^{-1}$) e a miricetina ($0,003 \text{ mg kg}^{-1}$). Non foron detectadas nin a quercetina nin a rutina, ao contrario dun traballo reportado para Martonovik *et al.*, [8], os cales si identificaron estes dous flavonois para as sementes de mostaza branca.

No aceite as concentración de flavonois foron moi pequenas ($<0,1 \%$ dos fenólicos totais) e destacou a ausencia de kaempferol-*O*-hexósido.

- **Flavonas.** Con respecto ás flavonas, o composto maioritario foi a luteolina-*O*-hexósido tanto na semente ($5,01 \text{ mg kg}^{-1}$) coma no aceite ($0,22 \text{ mg kg}^{-1}$). A luteolina identificouse nas dúas mostras mentres que a apixenina só se detectou na semente de mostaza *Sinapis alba*. A apixenina tamén se detectou previamente na semente de mostaza branca, pero non na mostaza castaña [48].

Táboa 4. Compostos fenólicos da semente desengraxada da *Sinapis alba* e no aceite extraído con etanol determinados por HPLC-ESI-MS/MS (en mg kg⁻¹)

Compostos fenólicos	Semente	Aceite
Ácidos hidroxibenzoicos		
Ácido <i>p</i> -hidroxibenzoico	6,417 ± 0,615 ^a	8,458 ± 0,012 ^b
Ácido salicílico	6,498 ± 0,392 ^a	8,426 ± 1,143 ^b
Ácido vanílico	0,843 ± 0,072 ^a	1,064 ± 0,052 ^b
Ácido sirínxico	0,297 ± 0,041 ^a	0,523 ± 0,025 ^b
Ácidos hidroxicinámicos		
Ácido sinápico	22,238 ± 1,467 ^a	26,528 ± 1,239 ^b
Ácido ferúlico	0,975 ± 0,086 ^a	1,083 ± 0,079 ^a
Ácido cafeico	0,066 ± 0,091 ^a	0,051 ± 0,001 ^b
Ácido <i>p</i> -cumárico	0,280 ± 0,025 ^a	0,290 ± 0,009 ^a
2,4-dihidroxicinámico	0,067 ± 0,003 ^a	0,006 ± 0,000 ^b
Ácido cloroxénico	0,006 ± 0,000	nd
4- vinilsiringol	1,912 ± 0,446 ^a	0,741 ± 0,111 ^b
Flavonois		
Kaempferol-O-hexósido	3,336 ± 0,430	nd
Kaempferol	0,010 ± 0,002 ^a	0,005 ± 1,59 ^b
Miricetina	0,003 ± 0,000	nd
Quercetina	<LC	0,004 ± 0,000
Rutina	<LC	0,007 ± 0,000
Flavonas		
Luteolina-O-hexósido	5,013 ± 0,593 ^a	0,217 ± 0,019 ^b
Luteolina	0,003 ± 0,000 ^a	0,001 ± 0,000 ^b
Apixenina	0,001 ± 0,000	nd

Diferentes letras indican diferenzas estatisticamente significativas entre as dúas mostras usando un ANOVA ($p < 0,05$). Número de determinacións realizadas ($n = 3$).

LC: límite de cuantificación. nd: non detectado

3.5. Determinación das actividades bioactivas dos lípidos e dos fenóis da semente

3.5.1. Actividade neuroprotectora

A procura de inhibidores naturais capaces de mellorar o déficit colinérxico restablecendo os niveis de ACh mediante a inhibición das dúas formas principais de colinesterasas (BuChE e AChE) é un dos tratamentos principais para mellorar os

síntomas da EA e outras formas de demencia [51]. Neste traballo avalíase a capacidade de extractos ricos en compostos fenólicos de semente e do aceite de *Sinapis alba* para inhibir as enzimas colinesterasas. Como se pode observar na figura 5A, os extractos de semente e de aceite da mostaza inhibiron a BuChE de forma dose dependente.

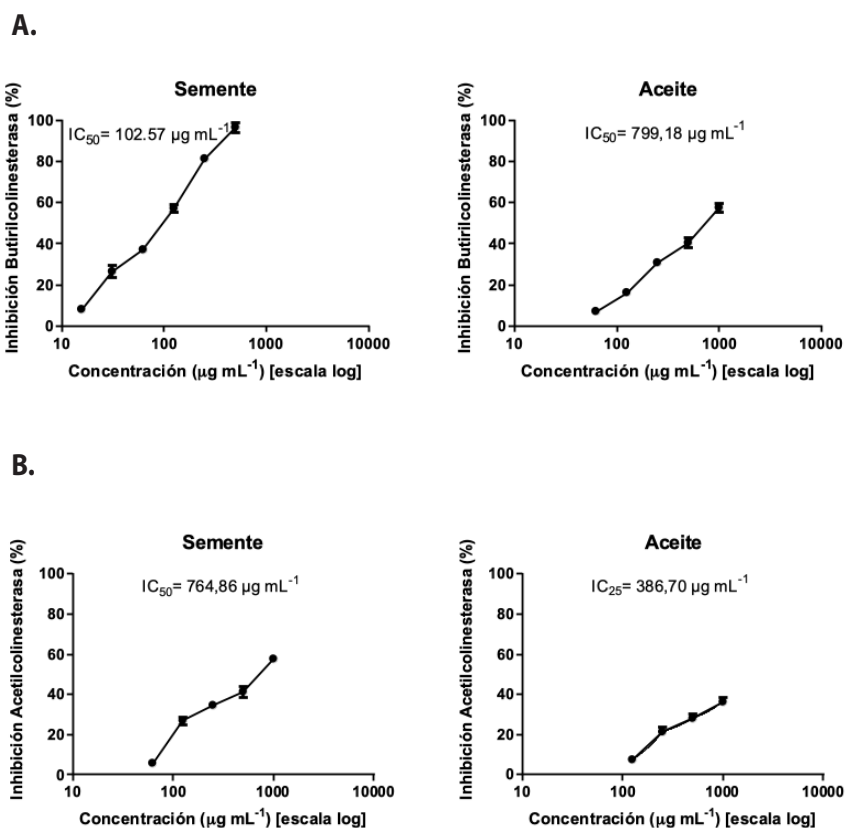


Figura 5. Inhibición das enzimas butirilcolinesterasa (A) e acetilcolinesterasa (B) en relación coa concentración dos extractos de semente e aceite estudados neste traballo.

Número de determinacións realizadas ($n = 3$)

A partir da figura 5 como medida da potencia inhibidora dos extractos probados, calculouse o valor de IC₅₀ (valor da concentración do extracto capaz de producir unha inhibición do 50 % da actividade desta enzima) amosando a maior actividade os extractos ricos en compostos fenólicos da semente (IC₅₀ = 103 µg mL⁻¹), seguidos do aceite extraído con etanol (IC₅₀ = 799 µg mL⁻¹). Respecto á inhibición da AChE, tanto

a semente coma o aceite foron capaces de inhibir esta enzima de forma dependente da concentración (figura 5B), aínda que en menor medida ca fronte a BuChE. Neste senso o valor de IC_{50} para a semente foi de $765 \mu\text{g mL}^{-1}$, mentres que para o aceite só foi posible calcular o IC_{25} ($387 \mu\text{g mL}^{-1}$), o que demostra unha inhibición menor.

Como se aprecia na figura 5, a semente de mostaza mostrou unha inhibición máis potente contra ambas enzimas. Esta dualidade enzimática revela efectos anticolinérxicos máis fortes e pode aumentar a eficacia do tratamento do Alzheimer [52]. Polo contrario, o aceite de mostaza foi máis selectivo sobre a inhibición da BuChE. Esta selectividade mostrada por algúns produtos naturais pode ser positiva, porque tamén poderían previr a formación de novas placas de β -amiloide (asociadas á enzima BuChE), e limitar así a progresión da EA [53].

Baixo o noso coñecemento, unicamente hai un traballo no que se avalía a actividade inhibidora in vitro contra a AChE por parte das sementes das variedades *Brassica alba* e *Brassica nigra* e conclúese que é a última variedade a que presenta unha actividade maior fronte a esta enzima ($135 \mu\text{g mL}^{-1}$). Existen algúns traballos in vivo que utilizan animais de experimentación nos que se mostra un efecto positivo da planta de mostaza sobre a inhibición da AChE. Un exemplo é un estudo con ratas, que se alimentaron durante 16 semanas con dietas que contiñan un 20 % de aceite de cacahuete, coco, cártamo ou mostaza que mostrou unha actividade da AChE significativamente maior no grupo de animais alimentado con aceite de mostaza [54]. Outro estudo, no que os peixes *Channa punctatus* se alimentaron con torta de aceite de mostaza, observouse un aumento na actividade da colinesterasa cerebral [55].

Unha posible hipótese sobre a actividade observada dos fenois extraídos da semente e o aceite de *Sinapis alba* fronte ás enzimas colinesterasas pode ser a presenza de compostos fenólicos que xa foron estudados como fontes naturais de inhibición destas enzimas [56]. Por exemplo, observouse a correlación entre a actividade anticolinesterasa e os compostos fenólicos non flavonoides como os ácidos hidroxibenzoicos (p. e. ácido sirínxico) [57], os ácidos hidroxicinámicos (p. e. ácido *p*-cumárico) [58] e entre os compostos fenólicos flavonoides (p. e. a luteolina [59] ou a quercetina [60]). De todos os xeitos, é fundamental considerar que a actividade biolóxica dun extracto non se limita unicamente á acción dun composto ou da súa concentración, senón que tamén son importantes as interaccións sinérxicas ou antagonistas de todos os compostos presentes.

3.5.2. Actividade antimicrobiana

Outro obxectivo deste proxecto INOU foi avaliar o potencial antimicrobiano das distintas fraccións obtidas da planta da mostaza. Tal e como se indicou previamente, os traballos existentes sobre antimicrobianos e mostaza están enfocados á súa análise na aplicación en alimentos, pero non existen referencias sobre o seu potencial inhibitorio contra microorganismos patóxenos que están amosando resistencia aos antibióticos dispoñibles, e que son responsables dunha gran mortalidade de persoas ao ano [3, 4]. Neste traballo, os microorganismos patóxenos seleccionados foron dous estafilococos e un fungo de gran relevancia no eido da saúde. Como se amosa na táboa 5, analizouse a actividade antimicrobiana de tres fraccións da mostaza: a infusión das follas, os fenois extraídos a partir dos lípidos e os fenois extraídos a partir da semente. Os resultados foron os seguintes:

- *Staphylococcus epidermis*. Este estafilococo está implicado no desenvolvemento de enfermidades cutáneas, como é a dermatite atópica. Non obstante, tamén é un patóxeno oportunista, responsable de graves infeccións no torrente sanguíneo. Aínda que é un patóxeno menos agresivo ca outras especies do xénero, a alta frecuencia de infección por cepas resistentes fai que sexa necesario a procura de alternativas farmacolóxicas [61], sen embargo ningunha das fraccións ensaiadas amosou actividade fronte a este microorganismo patóxeno.

- *Staphylococcus aureus*. Este estafilococo é unha bacteria Gram + que de xeito habitual se atopa no tracto respiratorio e na pel. Non obstante, no caso de doentes con inmunodeficiencias ou feridas, poden provocar graves infeccións e intoxicacións, e chegan a causar a morte por pneumonía ou por sepsia [62]. Os resultados amosaron o potencial que os fenois extraídos da semente e do aceite da mostaza posúen como antimicrobiano fronte a este patóxeno, de xeito que atopar esta actividade é un feito de gran relevancia e abre unha nova liña a desenvolver.

- *Candida albicans*. Este microorganismo é o patóxeno fúnxico máis común en seres humanos e causa unha ampla gama de infeccións desde a mucosa superficial ata a formación de biopelículas fúnxicas (candidiase). A formacións destas biopelículas actúa como un reservorio de células patóxenas, moi resistentes aos fármacos e

ao sistema inmunitario do hóspede, e dan lugar a taxas de mortalidade clínica de aproximadamente 30-40 % [63]. Ademais, investigacións recentes indican algún tipo de conexión entre a presenza de *C. albicans* e o cancro, aínda que se está a discutir se a infección por *C. albicans* é unha complicación derivada do cancro ou se é un factor contribuínte ao desenvolvemento desta enfermidade [64]. O test de difusión en ágar-ágar amosou que a infusión a partir das follas ten actividade fronte a este fungo. Polo tanto, os resultados obtidos a partir da infusión das follas da planta da mostaza abre unha nova vía de ensaio de gran relevancia, posto que se trata dunha técnica verde, económica e de baixo custo ao non requirir de equipo específico ou de solventes químicos.

Táboa 5. Halos de inhibición (en cm) producidos polas mostras fronte aos tres microorganismos patóxenos e tres volumes (μ l) ensaiados dun inóculo 10^8 UFC mL⁻¹

Microorganismos patóxenos									
	<i>S. aureus</i>			<i>S. epidermis</i>			<i>C. albicans</i>		
	50	100	200	50	100	200	50	100	200
1	-	-	-	-	-	-	1,1 \pm 0,10	1,0 \pm 0,00	+
2	1,35 \pm 0,05	1,25 \pm 0,05	1,00 \pm 0,00	-	-	-	-	-	-
3	1,55 \pm 0,05	1,40 \pm 0,05	1,20 \pm 0,10	-	-	-	-	-	-

Código das mostras: **1**: infusión de follas de mostaza;

2: fenóis extraídos dos lípidos recuperados con etanol; e **3**: fenóis extraídos a partir da semente
(-) : sen efecto antimicrobiano; (+) : halo visible pero non medible

Un feito positivo de esta variación da actividade antimicrobiana segundo a fracción da planta da mostaza empregada, é que permite un maior aproveitamento e revalorización da biomasa xerada. Por unha banda, poderíanse recuperar as follas para infusións con potencial antimicrobiano contra fungos; e, pola outra, sería posible recuperar os lípidos como ingrediente funcional e a fracción fenólica como antimicrobiana fronte a *S. aureus*.

Recentemente, as plantas oleaxinosas están a espertar interese polos seus efectos antimicrobianos, anticanceríxenos, antivirais, antiinflamatorios, hipolipidémicos e hipoglucémicos. Parte destas propiedades é debida a presenza de compostos fenólicos, que constitúen o grupo máis destacado de compostos bioactivos presentes en materiais vexetais. Como exemplo, os ácidos hidroxibenzoicos e os hidroxicinámicos son metabolitos secundarios aromáticos responsables das características organolépticas

dos alimentos, están asociados a varios beneficios para a saúde polas súas propiedades antioxidante e a antimicrobiana [65]. Pero é necesario resaltar que, a bioactividade destes compostos dependerá da súa natureza química e da súa combinación con outros compostos. Nas sementes oleaxinosas, os fenóis pódense atopar libres, esterificados, eterificados ou insolubles, e para a súa correcta recuperación é necesario levar a cabo procedementos específicos, tales coma hidrólises ácidas ou alcalinas [66]. Isto quere dicir, que segundo o procedemento empregado os fenóis liberados serán de diversa natureza, e polo tanto de diversa bioactividade. Isto indica que as actividades antimicrobianas detectadas neste proxecto INOU son susceptibles de ser melloradas a través de procedemento de hidrólise química alcalina ou ácida que permita liberar outro tipo de fenóis.

Finalmente, a mostaza é rica nun composto non fenólico denominado isotiocianato de alilo, que se produce pola acción da mirosinasa ao hidrolizar a sinigrina. Este composto volátil responsable do sabor picante da mostaza si posúe actividade antimicrobiana e estudos recentes avalían o seu uso en alimentos [20, 21]. No caso de *Sinapis alba*, os glucosinolatos derivan da sinalbina e, aínda que non se atopou bibliografía ao respecto, existen traballos que amosan a capacidade antimicrobiana da fracción volátil dos aceites esenciais desta variedade [19]. Estes compostos volátiles tampouco foron avaliados, polo que este traballo constitúe a base de coñecemento para desenvolver novos traballos, que exploren o seu uso como antimicrobiano.

4 Conclusións

A extracción de lípidos das sementes de *Sinapis alba* mediante etanol revelou un alto contido de lípidos, superando as expectativas nutricionais comerciais, cunha composición elevada de ácidos graxos, especialmente oleico, linoleico e araquidónico, o que ofrece beneficios para a saúde grazas á presenza dos ácidos omega 6 e omega 9. Ademais, a semente e o aceite de *Sinapis Alba* amosaron concentracións elevadas de compostos fenólicos pertencentes ás familias químicas dos ácidos fenólicos e en menor cantidade dos compostos flavonoides. Estes extractos ricos en compostos fenólicos mostraron actividade neuroprotectora ao inhibir as enzimas colinesterasas relacionadas coa enfermidade de Alzheimer, así como a actividade antimicrobiana contra os patóxenos *Staphylococcus aureus* e *Candida albicans*. En conclusión, este traballo mostra como as sementes e o aceite da mostaza constitúen fontes naturais de compostos bioactivos con propiedades beneficiosas para a saúde, que poderían

ser empregadas en aplicacións alimentarias e farmacéuticas. Asemade, a introdución desta especie no agro galego pode ter vantaxes para mellorar as propiedades do solo e impulsar a agricultura ecolóxica.

Agradecementos

Esta investigación foi financiada pola Deputación Provincial de Ourense mediante as axudas concedidas na convocatoria de axudas a grupos de investigación do campus de Ourense (INOUE23-6) ao proxecto con título «Mostaza máis ca un mollo. Compostos bioactivos e a súa repercusión na saúde». A. Pérez-Paz agradécelle o financiamento á Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria da Xunta de Galicia pola súa bolsa posdoutoral ED481B2018/073. M. Figueiredo-González agradécelle á Universidade de Vigo o seu contrato «Programa de retención de talento, 2021». P. Reboredo-Rodríguez agradécelle o financiamento ao MCIN/AEI/10.13039/501100011033 e o FSE+ polo seu contrato Ramón y Cajal RYC2022-037075-I.

5 Referencias

- [1] Oboh G, Ademiluyi AO, Akinyemi AJ, Henle T, Saliu JA, Schwarzenbolz U. Inhibitory effect of polyphenol-rich extracts of jute leaf (*Corchorus olitorius*) on key enzyme linked to type 2 diabetes (α -amylase and α -glucosidase) and hypertension (angiotensin I converting) in vitro. *J Funct Foods* 2012;4:450–8. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.02.003>.
- [2] Zhang Z, Dai L, Wang H, Chang X, Ren S, Lai H, et al. Phytochemical profiles and antioxidant, anticholinergic, and antidiabetic activities of *Odontites serotina* (Lam.) Dum. *Eur J Integr Med* 2021;44:101340. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2021.101340>.
- [3] World Health organization. Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos 2016.
- [4] Plan estratégico 2022-2024 del plan nacional frente a la resistencia a los antibióticos (PRAN). NIPO: 134-22-008-5 2022. <https://www.resistenciaantibioticos.es/es>.
- [5] Başıyigit B, Alaşalvar H, Doğan N, Doğan C, Berktaş S, Çam M. Wild mustard (*Sinapis arvensis*) parts: compositional analysis, antioxidant capacity and determination of individual phenolic fractions by LC–ESI–MS/MS. *Journal of Food Measurement and Characterization* 2020;14:1671–81. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00415-2>.
- [6] Xunta de Galicia. RIS3 Galicia 21-27 n.d. <https://ris3galicia.es/#> (accessed March 13, 2024).

- [7] Lee YH, Choo C, Waisundara VY. Determination of the total antioxidant capacity and quantification of phenolic compounds of different solvent extracts of black mustard seeds (*Brassica nigra*). *Int J Food Prop* 2015;18:2500–7. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.986331>.
- [8] Martinović N, Polak T, Ulrih NP, Abramovič H. Mustard Seed: Phenolic composition and effects on lipid oxidation in oil, oil-in-water emulsion and oleogel. *Ind Crops Prod* 2020;156. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112851>.
- [9] Boscarol R, Rasera G, Hilckner MH, de Alencar SM, de Castro RJS. Biologically active compounds from white and black mustard grains: An optimization study for recovery and identification of phenolic antioxidants. *Ind Crops Prod* 2019;135:294–300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.059>.
- [10] Torrijos R, Righetti L, Cirilini M, Calani L, Mañes J, Meca G, et al. Phytochemical profiling of volatile and bioactive compounds in yellow mustard (*Sinapis alba*) and oriental mustard (*Brassica juncea*) seed flour and bran. *LWT* 2023;173:114221. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114221>.
- [11] Li X, Pang W, Piao Z. Omics meets phytonutrients in vegetable brassicas: For nutritional quality breeding. *Hortic Plant J* 2017;3:247–54. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2017.11.001>.
- [12] de la Rosa LA, Moreno-Escamilla JO, Rodrigo-García J, Alvarez-Parrilla E. Phenolic compounds. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, Elsevier; 2019, p. 253–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00012-9>.
- [13] Nicácio AE, Rodrigues CA, Visentainer JV, Maldaner L. Evaluation of the QuEChERS method for the determination of phenolic compounds in yellow (*Brassica alba*), brown (*Brassica juncea*), and black (*Brassica nigra*) mustard seeds. *Food Chem* 2021;340:128162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128162>.
- [14] Chew YL, Ling Chan EW, Tan PL, Lim YY, Stanslas J, Goh JK. Assessment of phytochemical content, polyphenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of Leguminosae medicinal plants in Peninsular Malaysia. *BMC Complement Altern Med* 2011;11:12. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-11-12>.
- [15] Custódio L, Patarra J, Alberício F, Neng N da R, Nogueira JMF, Romano A. Phenolic composition, antioxidant potential and in vitro inhibitory activity of leaves and acorns of *Quercus suber* on key enzymes relevant for hyperglycemia and Alzheimer's disease. *Ind Crops Prod* 2015;64:45–51. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.001>.
- [16] Ferreres F, Grosso C, Gil-Izquierdo A, Fernandes A, Valentão P, Andrade PB. Comparing the phenolic profile of *Pilocarpus pennatifolius* Lem. by HPLC–DAD–ESI/MS n with respect to authentication and enzyme inhibition potential. *Ind Crops Prod* 2015;77:391–401. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.006>.
- [17] Kulshreshtha A, Piplani P. Current pharmacotherapy and putative disease-modifying therapy for Alzheimer's disease. *Neurological Sciences* 2016;37:1403–35. <https://doi.org/10.1007/s10072-016-2625-7>.

- [18] López-Miranda J, Badimon L, Bonanome A, Lairon D, Kris-Etherton PM, Mata P, et al. Monounsaturated fat and cardiovascular risk. *Nutr Rev* 2006;64:2–12. <https://doi.org/10.1301/nr.2006.oct.S2-S12>.
- [19] Peng C, Zhao S-Q, Zhang J, Huang G-Y, Chen L-Y, Zhao F-Y. Chemical composition, antimicrobial property and microencapsulation of mustard (*Sinapis alba*) seed essential oil by complex coacervation. *Food Chem* 2014;165:560–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.126>.
- [20] Porter JA, Morey A, Monu EA. Antimicrobial efficacy of white mustard essential oil and carvacrol against *Salmonella* in refrigerated ground chicken. *Poult Sci* 2020;99:5091–5. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.027>.
- [21] Bahmid NA, Dekker M, Fogliano V, Heising J. Development of a moisture-activated antimicrobial film containing ground mustard seeds and its application on meat in active packaging system. *Food Packag Shelf Life* 2021;30:100753. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100753>.
- [22] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D, et al. NREL/TP-510-42618 analytical procedure - Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass. vol. 2011. 2012. <https://doi.org/NREL/TP-510-42618>.
- [23] Sluiter A, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D. NREL/TP-510-42619 analytical procedure - Determination of Extractives in Biomass. 2008.
- [24] Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal Chem* 1959;31:426–8. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.
- [25] Singleton VL, Rossi JA. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am J Enol Vitic* 1965;16:144 LP – 158.
- [26] Consejo Oleícola Internacional. Determinación de los biofenoles de los aceites de oliva mediante HPLC. COI/T.20/Doc. nº. 29. 2009.
- [27] Paz A, Chalima A, Topakas E. Biorefinery of exhausted olive pomace through the production of polygalacturonases and omega-3 fatty acids by *Cryptocodinium cohnii*. *Algal Res* 2021;59:102470. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102470>.
- [28] Paz A, Karnaouri A, Templis CC, Papayannakos N, Topakas E. Valorization of exhausted olive pomace for the production of omega-3 fatty acids by *Cryptocodinium cohnii*. *Waste Management* 2020;118:435–44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.011>.
- [29] Chalima A, Hatzidaki A, Karnaouri A, Topakas E. Integration of a dark fermentation effluent in a microalgal-based biorefinery for the production of high-added value omega-3 fatty acids. *Appl Energy* 2019;241:130–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.058>.
- [30] Vinholes J, Grosso C, Andrade PB, Gil-Izquierdo A, Valentão P, Pinho PG de, et al. *In vitro* studies to assess the antidiabetic, anti-cholinesterase and antioxidant potential of *Spergularia rubra*. *Food Chem* 2011;129:454–62.

- [31] Paz A, da Silva Sabo S, Vallejo M, Marguet E, Pinheiro de Souza Oliveira R, Domínguez JM. Using brewer's spent grain to formulate culture media for the production of bacteriocins using Patagonian strains. *Lwt* 2018;96:166–74.
- [32] Saavedra M, Castillo F, Pérez-Melgares JD, Hidalgo JC, Alcántara C. Características de *Sinapis alba* subsp. *mairei* como Cubierta Vegetal y para Biofumigación. *Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera* 2015:1–27.
- [33] Morra MJ, Popova IE, Boydston RA. Bioherbicidal activity of *Sinapis alba* seed meal extracts. *Ind Crops Prod* 2018;115:174–81.
- [34] Eugui D, Escobar C, Velasco P, Poveda J. Glucosinolates as an effective tool in plant-parasitic nematodes control: Exploiting natural plant defenses. *Applied Soil Ecology* 2022;176:104497.
- [35] Karamaouna F, Kati V, Volakakis N, Varikou K, Garantonakis N, Economou L, et al. Ground cover management with mixtures of flowering plants to enhance insect pollinators and natural enemies of pests in olive groves. *Agric Ecosyst Environ* 2019;274:76–89. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.004>.
- [36] Berlanas C. New insights into the biology, ecology and control of black-foot disease in grapevine. Tesis doctoral Universidad de la Rioja, 2020.
- [37] Divakaran M, Babu KN. Mustard. *Encyclopedia of Food and Health*, Elsevier; 2016, p. 9–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00475-X>.
- [38] Nabi BG, Mukhtar K, Ahmed W, Manzoor MF, Ranjha MMAN, Kieliszek M, et al. Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Biosci* 2023;52:102403. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102403>.
- [39] Saini RK, Prasad P, Shang X, Keum Y-S. Advances in Lipid Extraction Methods—A Review. *Int J Mol Sci* 2021;22:13643. <https://doi.org/10.3390/ijms222413643>.
- [40] Bäumlér ER, Carrín ME, Carelli AA. Extraction of sunflower oil using ethanol as solvent. *J Food Eng* 2016;178:190–7. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.020>.
- [41] Cereceres Aragón A, Rodríguez Tadeo A, Álvarez Parrilla E, Rodrigo García J. Ingestión de compuestos fenólicos en población adulta mayor. *Nutr Hosp* 2018. <https://doi.org/10.20960/nh.2171>.
- [42] Kozłowska M, Gruczyńska E, Ścibisz I, Rudzińska M. Fatty acids and sterols composition, and antioxidant activity of oils extracted from plant seeds. *Food Chem* 2016;213:450–6. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.102>.
- [43] Romero N, Saavedra J, Tapia F, Sepúlveda B, Aparicio R. Influence of agroclimatic parameters on phenolic and volatile compounds of Chilean virgin olive oils and characterization based on geographical origin, cultivar and ripening stage. *J Sci Food Agric* 2016;96:583–92. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7127>.

- [44] Figueiredo-González M, Olmo-García L, Reboredo-Rodríguez P, Serrano-García I, Leuyacc-del Carpio G, Cancho-Grande B, et al. Singular olive oils from a recently discovered spanish North-Western cultivar: An exhaustive 3-year study of their chemical composition and *in vitro* antidiabetic potential. *Antioxidants* 2022;11:1233. <https://doi.org/10.3390/antiox11071233>.
- [45] Thiyam-Holländer U, Aladedunye F, Logan A, Yang H, Diehl BWK. Identification and quantification of canolol and related sinapate precursors in Indian mustard oils and Canadian mustard products. *European Journal of Lipid Science and Technology* 2014;116:1664–74. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400222>.
- [46] Shahidi F, Naczki M. Phenolics in food and nutraceuticals. CRC Press; 2003. <https://doi.org/10.1201/9780203508732>.
- [47] Engels C, Schieber A, Gänzle MG. Sinapic acid derivatives in defatted Oriental mustard (*Brassica juncea* L) seed meal extracts using UHPLC-DAD-ESI-MS n and identification of compounds with antibacterial activity. *European Food Research and Technology* 2012;234:535–42. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1669-z>.
- [48] Zhang Y, Lu J, Liu Y, Zhao C, Yi J, Zhu J, et al. Polyphenols of brown (*Brassica juncea*) and white (*Sinapis alba*) mustard seeds: Extraction optimization, compositional analysis, antioxidant, and immunomodulatory activities. *Food Biosci* 2024;58:103753. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103753>.
- [49] Wijesundera C, Ceccato C, Fagan P, Shen Z. Seed roasting improves the oxidative stability of canola (*B. napus*) and mustard (*B. juncea*) seed oils. *European Journal of Lipid Science and Technology* 2008;110:360–7. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700214>.
- [50] Cartea ME, Francisco M, Soengas P, Velasco P. Phenolic Compounds in *Brassica* Vegetables. *Molecules* 2010;16:251–80.
- [51] Menichini F, Tundis R, Bonesi M, Loizzo M, Conforti F, Statti G, et al. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chem* 2009;114:553–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>.
- [52] Giacobini E. Cholinesterase inhibitors: new roles and therapeutic alternatives. *Pharmacol Res* 2004;50:433–40. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2003.11.017>.
- [53] Figueiredo-González M, Valentão P, Andrade PB. Tomato plant leaves: From by-products to the management of enzymes in chronic diseases. *Ind Crops Prod* 2016;94:621–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.036>.
- [54] Vajreswari A, Narayanareddy K. Effect of dietary fats on some membrane-bound enzyme activities, membrane lipid composition and fatty acid profiles of rat heart sarcolemma. *Lipids* 1992;27:339–43. <https://doi.org/10.1007/BF02536147>.
- [55] Susanta N, Chiroprotim S, Sekhar BH, Matozzo V. Effects of organic fertilizer on hepatic lipid levels and cholinesterase activity in *Channa punctatus* (Bloch). *Philipp J Sci* 2016;145:413–8.

- [56] Zhang L, Rocchetti G, Zengin G, Ak G, Saber FR, Montesano D, et al. The UHPLC-QTOF-MS phenolic profiling and activity of *Cydonia oblonga* mill. reveals a promising nutraceutical potential. *Foods* 2021;10:1230.
- [57] de Torre MP, Caverio RY, Calvo MI. Anticholinesterase activity of selected medicinal plants from Navarra region of Spain and a detailed phytochemical investigation of *Origanum vulgare* L. *ssp. vulgare*. *Molecules* 2022;27:7100.
- [58] Szwajgier D, Borowiec K. Phenolic acids from malt are efficient acetylcholinesterase and butyrylcholinesterase inhibitors. *Journal of the Institute of Brewing* 2012;118:40–8. <https://doi.org/10.1002/jib.5>.
- [59] Conforti F, Rigano D, Formisano C, Bruno M, Loizzo MR, Menichini F, et al. Metabolite profile and *in vitro* activities of *Phagnalon saxatile* (L.) Cass. relevant to treatment of Alzheimer's disease. *J Enzyme Inhib Med Chem* 2010;25:97–104. <https://doi.org/10.3109/14756360903018260>.
- [60] Orhan IE. Cholinesterase inhibitory potential of quercetin towards alzheimer's disease—a promising natural molecule or fashion of the day? A narrowed review. *Curr Neuropharmacol* 2021;19:2205–13.
- [61] Beck C, Krusche J, Elsherbini AMA, Du X, Peschel A. Phage susceptibility determinants of the opportunistic pathogen *Staphylococcus epidermidis*. *Curr Opin Microbiol* 2024;78:102434. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2024.102434>.
- [62] Ali Alghamdi B, Al-Johani I, Al-Shamrani JM, Musamed Alshamrani H, Al-Otaibi BG, Almazmomi K, et al. Antimicrobial resistance in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Saudi J Biol Sci* 2023;30:103604.
- [63] Fan F, Liu Y, Liu Y, Lv R, Sun W, Ding W, et al. *Candida albicans* biofilms: antifungal resistance, immune evasion, and emerging therapeutic strategies. *Int J Antimicrob Agents* 2022;60:106673.
- [64] Wang X, Zhang W, Wu W, Wu S, Young A, Yan Z. Is *Candida albicans* a contributor to cancer? A critical review based on the current evidence. *Microbiol Res* 2023;272:127370. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127370>.
- [65] Rashmi HB, Negi PS. Phenolic acids from vegetables: A review on processing stability and health benefits. *Food Research International* 2020;136:109298. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109298>.
- [66] Alu'datt MH, Rababah T, Alhamad MN, Al-Mahasneh MA, Almajwal A, Gammoh S, et al. A review of phenolic compounds in oil-bearing plants: Distribution, identification and occurrence of phenolic compounds. *Food Chem* 2017;218:99–106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.057>.

SADiSiR: sistema de automatización do diagnóstico a partir de signos radiolóxicos

D. Ruano-Ordás,¹ S. Gómez Meire,¹ T. R. Cotos-Yañez,² e R. Pavón¹

¹*Departamento de Informática. Campus de Ourense. Universidade de Vigo*

²*Departamento de Estatística e Investigación Operativa.*

Campus de Ourense. Universidade de Vigo

drordas@uvigo.gal; sgmeire@uvigo.gal; cotos@uvigo.gal; pavon@uvigo.gal

Resumo

No campo da medicina, a interpretación precisa de signos radiolóxicos é fundamental para o diagnóstico eficaz de enfermidades. Con todo, a abafadora cantidade de datos radiolóxicos desafia a capacidade dos e das profesionais da saúde para analizalos exhaustivamente. Neste sentido, a intelixencia artificial (IA) e os algoritmos de aprendizaxe automática xorden como unha solución crucial.

O adestramento de algoritmos, utilizando conxuntos de signos radiolóxicos clinicamente relevantes e diversificados, permite construír modelos de aprendizaxe capaces de recoñecer patróns complexos e asociacións ocultas entre signos radiolóxicos. Isto facilita tanto obter diagnósticos máis rápidos e precisos coma identificar patoloxías en etapas temperás e, polo tanto, mellorar a calidade asistencial do servizo de radiodiagnose.

Neste senso, desenvolveuse SADiSiR, unha ferramenta orientada a: (i) xerar diagnósticos personalizados en función das características de cada paciente e (ii) servir de apoio á decisión do facultativo ou facultativa. O protocolo experimental deseñado

realizouse sobre o conxunto de datos PadChest cunha validación cruzada estratificada de $k = 6$. Os resultados obtidos demostran que RandomForest é o mellor algoritmo de clasificación cuns valores Kappa e ROC de 0,923 e 0,967, respectivamente.

Palabras clave: intelixencia artificial, software libre, diagnóstico médico, aprendizaxe automática e radiodiagnóstico

1. Introducción

O crecemento e o envellecemento da poboación, xunto á aparición de novos e máis mortíferos virus, están a provocar un aumento significativo da demanda de atención sanitaria, concretamente un incremento significativo na realización de probas diagnósticas de imaxe. Isto permite identificar, de forma rápida e indolora, unha gran variedade de enfermidades que non se poden detectar mediante outras probas clínicas (como pneumonías, cancros e infeccións pulmonares). Así mesmo, permite reducir a necesidade de recorrer a procedementos máis invasivos, como a cirurxía exploratoria. Ao permitir a detección temperá de diversas enfermidades, a radiografía facilita a realización de tratamentos máis eficaces, o que á súa vez contribúe a diminuír a taxa de mortalidade asociada a estas patoloxías.

A crecente demanda destas probas, xunto á actual escaseza de radiólogos e radiólogas no sistema sanitario español, incrementou as dificultades para informar de todos os estudos radiolóxicos que se realizan. Esta circunstancia provoca que unha elevada porcentaxe de radiografías sexan avaliadas directamente polos médicos e médicas de atención primaria, sen o filtro previo dunha ou dun especialista en radioloxía, o que aumenta as probabilidades de diagnosticar erroneamente as e os pacientes. Por iso, calquera acción encamiñada a reducir o tempo de diagnóstico dos estudos debe redundar en beneficio do sistema sanitario. En concreto, o uso de mecanismos de intelixencia artificial (IA) para asistir ao radiólogo ou radióloga e aumentar a rapidez e precisión do diagnóstico das radiografías tería un impacto positivo no sistema sanitario actual e no benestar da poboación. Tendo en conta estas consideracións, a presente proposta está orientada ao uso de técnicas de IA para axudar a interpretar imaxes de raios X de tórax.

Nos últimos anos, a comunidade científica publicou varios conxuntos de datos coa finalidade de avanzar no descubrimento automático de patoloxías en imaxes de raios X torácicas. Concretamente, persoas investigadoras da Comunitat Valenciana

crearon e publicaron PadChest [5], un conxunto de datos que comprende a asociación de cada imaxe de raios X xunto ás etiquetas que identifican os signos extraídos do correspondente informe radiolóxico. Ademais, este grupo tamén publicou e compartiu o conxunto de datos BIMCV-COVID19+ [22], que contén imaxes de raios X (e tomografía computerizada) de pacientes que contraeron o virus da covid-19. Doutra banda, CheXpert [12] contén un gran conxunto de datos de imaxes de raios X, que utilizan 14 etiquetas e que representan signos radiolóxicos e enfermidades. Tamén inclúe a etiqueta «sin hallazgos» para sinalar as imaxes que non teñen ningún signo radiolóxico presente. Do mesmo xeito ca en PadChest, a identificación das etiquetas realízase automaticamente a partir dos informes radiolóxicos. Por último, e aínda que o seu uso non está moi estendido, existen outros conxuntos de datos de menor tamaño [6, 7, 13] e de baixa calidade [17].

Porén, e tras unha exhaustiva análise dos conxuntos de datos mencionados anteriormente, detectáronse moitas radiografías de tórax sen etiquetar (actualmente máis do 70 % das analizadas). Neste senso, existen algúns conxuntos de datos [23] que se poderían utilizar para o desenvolvemento, implantación e proba de sistemas de cribado [14, 16] utilizando unha única imaxe radiolóxica por paciente. A análise computacional de patoloxías, a partir de signos radiolóxicos detectados en imaxes de raios X de tórax, tratouse en varios estudos de investigación. Con todo, ningún destes enfoques desenvolve técnicas de IA explicable (XAI) [11] para axudar as persoas expertas a revisar os diagnósticos computerizados que permitan, dunha forma sinxela, corrixir e detectar posibles erros. Ademais, ningún destes enfoques é capaz de evitar por completo os erros de tipo II (clasificar como san unha ou un paciente que presenta signos radiolóxicos) e, por tanto, non cumpre os requisitos de «contestabilidade» [20]. Neste sentido, o desenvolvemento e a implantación de sistemas de apoio á decisión precisos e eficientes segue sendo un reto importante neste ámbito.

2. SADiSiR: conceptos esenciais e funcionamento

Tal e como se comentou con anterioridade, o obxectivo principal deste proxecto consistiu en realizar un sistema centrado en dous eixes fundamentais: (i) axilizar e facilitar o proceso de identificación do diagnóstico, e (ii) diminuír a probabilidade de erro no diagnóstico, o que permitirá reducir a sobrecarga de traballo e, polo tanto, conseguir unha mellora da calidade asistencial do servizo. Para iso, o sistema de apoio á

decisión debe dispor da capacidade de (i) identificar automaticamente os diagnósticos máis probables a partir dos signos radiolóxicos presentes nunha imaxe de raios X de tórax mediante a combinación de técnicas de intelixencia artificial (IA) e modelos de aprendizaxe máquina (ML), e (ii) a xeración automática de informes radiolóxicos que identifiquen, de forma concisa, o diagnóstico máis probable mediante o uso de diferentes técnicas de procesamento da linguaxe natural (NLP).

Tal e como se pode observar no esquema xeral de funcionamento na figura 1, a aplicación divídese en dúas etapas encargadas da (i) identificación dos signos radiolóxicos e (ii) xeración de informes radiolóxicos e diagnósticos.

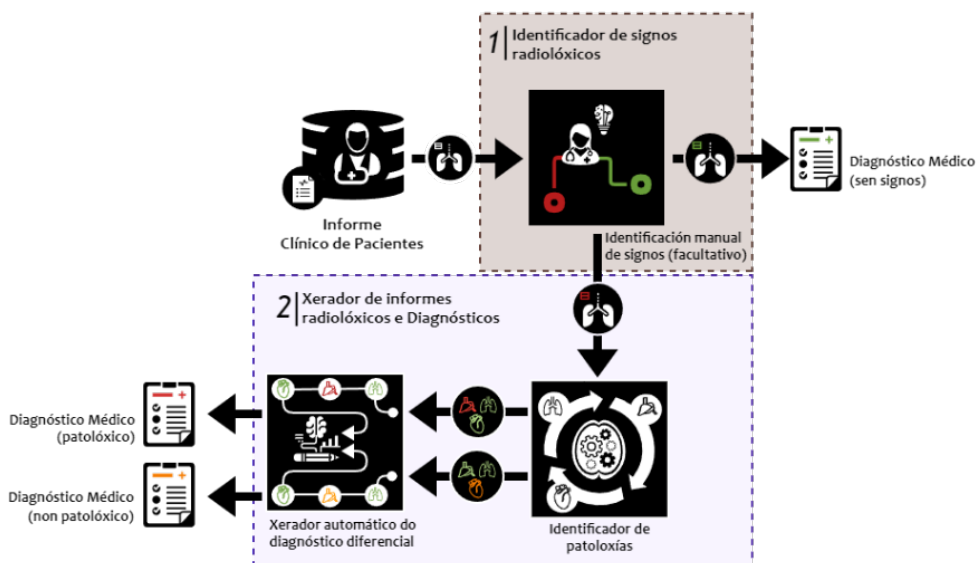


Figura 1. Modo de funcionamento da ferramenta

A primeira etapa é totalmente manual e permítelle ao facultativo ou facultativa introducir os signos radiolóxicos (achegas) atopados na imaxe de raios X. No caso de que non existan achegas, a ferramenta emitirá automaticamente un informe cun diagnóstico clínico favorable no que se indicará que o ou a paciente non presenta ningunha alteración. Por outro lado, a segunda etapa encárgase da xeración e da identificación automática de informes radiolóxicos e diagnósticos diferenciais no caso de que o facultativo ou facultativa reportase a existencia de achegas radiolóxicas. Tal e como se pode observar na figura 1, a segunda etapa está composta por dous

compoñentes: (i) o identificador de patoloxías e (ii) o xerador automático de diagnóstico diferencial. O primeiro compoñente encárgase de identificar, mediante o uso de modelos de ML, o diagnóstico diferencial (ou conxunto de diagnósticos máis probables) a partir dos signos radiolóxicos atopados. O segundo compoñente encárgase de xerar, mediante o uso de técnicas de NLP, o informe radiolóxico final a partir dos resultados obtidos polo compoñente previo (identificador de patoloxías). Como se indica na figura 1, os informes divídense en dúas categorías en función do tipo de diagnóstico médico diferencial: (i) diagnóstico médico patolóxico, que se refire á identificación de condicións ou enfermidades que afectan a saúde do ou da paciente, o cal inclúe a detección de anomalías, alteracións ou enfermidades que poidan requirir tratamento médico como intervención; e (ii) diagnóstico médico non patolóxico, que indica a ausencia de enfermidades, condicións médicas significativas no ou na paciente, ou cambios que non representen un problema de saúde relevante. É dicir, un informe non patolóxico indica que existen anomalías nas imaxes de raios X, pero que polas condicións da ou do paciente entran dentro da normalidade e, polo tanto, non supoñen un problema de saúde. Un claro exemplo é a cardiomegalia (agrandamento do corazón), que nun contexto non patolóxico pode xurdir como resposta adaptativa ao exercicio físico intenso ou debido aos cambios hemodinámicos normais durante o embarazo; mentres que nun contexto patolóxico está asociado con enfermidades cardíacas severas tales como a insuficiencia cardíaca, enfermidades coronarias, miocardiopatías, hipertensión arterial non controlada ou enfermidades valvulares cardíacas.

É importante ter en conta que as aplicacións orientadas ao ámbito sanitario teñen que ter unha taxa de falsos negativos moi reducida (ex.: clasificación como non patolóxico un signo patolóxico). Neste senso, todos os diagnósticos emitidos pola aplicación deben ser validados por un facultativo ou facultativa. No caso de que o diagnóstico sexa incorrecto, o sistema dispón dun mecanismo de aprendizaxe continuo que se activará readestrando os modelos coa información facilitada polo facultativo ou facultativa. Isto permitirá mellorar continuamente a eficiencia do sistema e, polo tanto, reducir os posibles erros.

Finalmente, co obxectivo de facilitarlle o uso da ferramenta a calquera tipo de usuario ou usuaria con independencia de seu nivel de dixitalización, desenvolveuse unha interface gráfica de escritorio que permite (i) indicar manualmente os signos

radiolóxicos atopados na imaxe, (ii) mostrar graficamente a probabilidade de cada un dos diagnósticos, (iii) seleccionar o diagnóstico máis apropiado (no caso de que o facultativo ou facultativa considere que o diagnóstico emitido pola ferramenta non sexa válido) e (iv) xerar o informe coa información do ou da paciente, os signos atopados e o diagnóstico diferencial previamente seleccionado.

3. Avaliación do modelo proposto

Tal e como se comentou con anterioridade, conseguir avances na detección automática de patoloxías a partir de signos radiolóxicos en imaxes de tórax é fundamental para mellorar a calidade asistencial do servizo de radiodiagnóstico, xa que permite tanto reducir as listaxes de espera coma a fiabilidade dos diagnósticos. Porén, dado que a sanidade é un sector crítico, considérase preceptivo que os sistemas de axuda ao diagnóstico desenvolvidos cumpran con dous requisitos fundamentais: (i) alta taxa de acerto e (ii) nula taxa de erros de tipo II.

Coa finalidade de validar se o modelo proposto cumpre os citados requisitos, deseñouse e executouse un protocolo experimental que garante a reproducibilidade, fiabilidade e precisión dos resultados obtidos.

3.1. Conxunto de datos

Dispor dun conxunto de datos coa información ben estruturada, seleccionada e consistente é fundamental, xa que facilita o adestramento de modelos e permite que se obteña un mellor rendemento en termos de clasificación/predición. Neste senso, e tras unha minuciosa análise dos corpus públicos existentes, decidiuse usar PadChest debido á súa completitude, xa que proporciona (i) unha colección de máis de 160 000 imaxes de radiografías de tórax etiquetadas por persoas radiólogas expertas do Hospital San Juan (España) dende 2009 ata 2017, e (ii) información clínica detallada acerca de 67 000 pacientes (como idade, estatura, xénero e diagnóstico). Os informes etiquetáronse con 174 achados radiográficos diferentes, 19 diagnósticos diferenciais e 104 localizacións anatómicas organizadas como unha taxonomía xerárquica asignada á terminoloxía estándar do sistema de linguaxe médica unificada (UMLS) [2]. Un 27 % dos informes foron anotados manualmente por persoal médico especialista mentres que o conxunto restante foi etiquetado utilizando un método supervisado baseado nunha rede neuronal recorrente (RNN) [21].

O conxunto de datos proporciona para cada imaxe de raios X de tórax tres tipos de campos: (i) os que almacenan os valores do estándar DICOM (StudyDate, PatientSex, ViewPosition, Modality, Manufacturer, PhotometricInterpretation, PixelRepresentation, Data representation of the pixel samples, PixelAspectRatio, SpatialResolution, BitsStored, WindowCenter, WindowWidth, Rows, Columns, XRayTubeCurrent, X-ray Tube Current, ExposureTime, Duration of x-ray exposure, Exposure, ExposureInuAs e RelativeXRayExposure), (ii) os datos inferidos da imaxe de raios X (ImageID, ImageDir, StudyID, Projection, ReportID, Report, MethodLabel, Labels, Localizations, LabelsLocalizationsBySentence, LabelCUIs e LocalizacionCUIs) e (iii) datos relacionados coa información do ou da paciente (PatientID e PatientBirth).

Pese á gran cantidade e diversidade contida no conxunto de datos, non todos os atributos son relevantes ou necesarios para o adestramento dos modelos de aprendizaxe encargados de inferir o diagnóstico máis axeitado. Neste senso, e tras unha profunda análise, elixíronse unicamente os seis atributos que se describen na táboa 1.

Columna	Significado
StudyDate_DICOM	Data na que se realizou o estudo radiolóxico
PatientBirth	Ano de nacemento do/a paciente
PatientSex_DICOM	Sexo do/a paciente: M (masculino), F (feminino) ou O (outro)
ReportID	Identificador do informe radiolóxico
Projection	Perspectiva dende a que se tomou a imaxe radiolóxica: PA (posteroanterior), L (lateral), AP (anteroposterior), AP_horizontal (anteroposterior horizontal), COSTAL (costal) o UNK (descoñecido)
Labels	Listaxe dos signos atopados nas imaxes (se hai)

Táboa 1. Atributos utilizados no estudo

A preparación dos datos é un paso crucial no proceso de aprendizaxe automática, xa que inflúe de maneira significativa na calidade do adestramento dos modelos, asegurando resultados máis precisos e fiables. A realización de tarefas como a limpeza dos datos, a eliminación de valores atípicos e a normalización das características son esenciais para garantir que os modelos aprendan patróns relevantes e xeren predicións precisas [4,9].

Neste senso, realizouse un preprocesamento ad hoc para cada tipo de atributo. Concretamente, no atributo `StudyDate_DICOM` extraeuse unicamente o ano da data en que se realizou o estudo. Co atributo `PatientBirth` realizáronse tres operacións de procesamento: (i) extracción do ano de nacemento, (ii) cálculo da idade do ou da paciente no momento da proba ($\text{PatientBirth} - \text{StudyDate_DICOM}$) e (iii) normalización do valor obtido previamente nun rango entre 0 e 1, sendo a idade mínima 0 e a idade máxima 120. Desta maneira, lógrase unha representación numérica da idade do ou da paciente que é consistente e comparable entre distintas imaxes radiolóxicas. No caso de `Projection`, mantivéronse unicamente as imaxes tomadas nas proxeccións PA, L e AP, e elimináronse as demais. Previamente, as proxeccións AP e AP_horizontal uníronse nunha soa categoría denominada AP para asegurar a uniformidade dos datos. O sexo do ou da paciente (`PatientSex_DICOM`) transformouse en tres columnas binarias: `PatientSex_DICOM_F`, `PatientSex_DICOM_M` e `PatientSex_DICOM_OU`. Para isto, identificáronse os valores presentes no campo de sexo (F, M e OU) e créanse as columnas correspondentes, asignando un valor de 1 na columna correspondente ao xénero do ou da paciente e un valor de 0 nas columnas restantes. Esta transformación permitiu representar de maneira numérica o xénero dos e das pacientes no conxunto de datos, o que resulta especialmente útil en modelos de aprendizaxe automática que utilizan datos numéricos como entrada. No caso do atributo `Labels`, realizouse unha transformación na que se converteu a listaxe de etiquetas correspondentes en columnas binarias individuais. Cada etiqueta converteuse nunha columna que contén un valor de 0 ou 1 dependendo de se a etiqueta está presente ou non na imaxe. Elimináronse valores inconsistentes como a etiqueta baleira ou o valor «unchanged». Ademais, diferenciouse entre as etiquetas correspondentes diagnósticos e signos radiolóxicos. Realizouse unha limpeza adicional para asegurar que un informe sen diagnóstico non puidese ter ningunha etiqueta de tipo diagnóstico. Finalmente, levouse a cabo unha unión de filas baseándose no identificador do informe (`ReportID`). Desta maneira, verificouse que para un mesmo valor da columna `ReportID` non houbo diferentes datas de nacemento.

Na táboa 2 pódese ver unha gran disparidade entre a cantidade de diagnósticos positivos e negativos. Os problemas de desequilibrio de datos poden ter un impacto significativo no adestramento dos modelos de aprendizaxe automática. Cando hai unha gran discrepancia entre o número de exemplos en cada clase dun conxunto de datos,

os modelos poden tender a favorecer a clase maior e ignorar ou clasificar erroneamente a clase menor. Isto pode levar a resultados nesgados e inexactos, especialmente se a clase minoritaria é a que realmente interesa ao problema en cuestión. Coa finalidade de paliar esta problemática, utilizouse unha técnica combinada de «oversampling» e «undersampling», mediante a cal se duplican os datos positivos e se diminúe o número de negativos ata alcanzar un equilibrio nos datos [18].

Diagnóstico	Orixinal		Balanceado
	Negativo (0)	Positivo (1)	Positivo = Negativo
Heart Insufficiency	105555	1860	3720
Bone Metastasis	107297	118	236
Atypical Pneumonia	107269	146	292
Pulmonary Hypertension	107332	83	166
Pulmonary Venous Hypertension	107411	4	8
Lepidic Adenocarcinoma	107407	8	16
Pneumonia	102442	4973	9946
Pulmonary Fibrosis	106707	708	1416
Respiratory Distress	107363	52	104
Post Radiotherapy Changes	107225	190	380
Pulmonary Edema	106148	1267	2534
Tuberculosis	107244	171	342
Lung Metastasis	107193	222	444
Lymphangitis Carcinomatosa	107387	28	56
Pulmonary Artery Hypertension	107389	26	52
Tuberculosis Sequelae	106789	626	1252
Emphysema	106521	894	1788

Táboa 2. Número de instancias positivas e negativas de cada diagnóstico

Tal e como se pode concluír da táboa 2, aínda que o conxunto inicial tiña unha gran cantidade de instancias, o altísimo grao de desequilibrio da clase negativa forzaría

inevitavelmente a que os modelos de aprendizaxe sobreadestrasen e favorecesen a identificación de diagnósticos negativos fronte aos positivos. Por outro lado, aínda que o conxunto final dispón de moitas menos instancias, están completamente balanceadas (cociente de balanceo 1:1): o peso de ambas as clases é o mesmo e o sobreadestramento é inexistente. En resumo, para conseguir un adestramento óptimo non só é importante o tamaño do conxunto de datos, senón que tamén a distribución de instancias entre clases sexa o máis equilibrada posible.

3.2. Selección dos modelos de aprendizaxe

Outro dos aspectos fundamentais de cara a desenvolver un sistema fiable e eficiente consiste na correcta elección dos modelos de aprendizaxe máis axeitados ao contexto do problema; é dicir, considerando a natureza dos datos. Tendo en conta o contexto descrito anteriormente, é esencial seleccionar modelos que sexan capaces de xestionar e sacar partido de datos codificados de forma binaria (0, 1).

Os modelos baseados en probabilidades, como Naïve Bayes [24], son amplamente utilizados en problemas de clasificación debido á súa eficacia e simplicidade. Os modelos incluídos neste grupo están baseados no uso de estratexias probabilísticas (como o teorema de Bayes). Unha das súas características principais é que se asume habitualmente que todas as variables son independentes entre si. En particular, seleccionáronse as variantes Multinomial Naive Bayes e Bernoulli Naive Bayes, xa que son as que mellor se adaptan á codificación do conxunto de datos.

Por outro lado, os modelos xeométricos utilizan principios de xeometría e de álgebra lineal para representar e analizar datos de maneira eficiente nun espazo multidimensional. Estes modelos funcionan mediante a creación dunha representación xeométrica dos datos, na que cada observación se asocia cun punto nun espazo n -dimensional (sendo n o número de características ou variables), coa finalidade de atopar estruturas xeométricas (como hiperplanos, esferas ou polígonos) que permitan separar ou clasificar os datos de maneira óptima segundo algún criterio predefinido (como a maximización da distancia entre clases ou a minimización do erro de predición). Un dos algoritmos máis coñecidos e utilizados pola súa gran capacidade de xeneralización e rapidez de clasificación/predición é o SVM [19]. En concreto, o SVM utiliza unha función (*kernel*) que transforma os datos nun espazo de caracte-

rísticas de dimensión maior, onde é máis fácil atopar un hiperplano capaz de separar as instancias de cada clase. O SVM permite que o tipo de *kernel* (linear, polinomial, radial ou sigmoide) se poida axustar en función da natureza dos datos.

O grupo dos «ensembles» permite combinar varios modelos de aprendizaxe automática para mellorar a precisión da predición. A idea subxacente deste tipo de modelos é que, ao combinar varios modelos sinxelos, se obtén un modelo complexo capaz de mellorar o rendemento individual dos modelos sinxelos. Neste caso, escolléronse os modelos Random Forests [3] e ExtraTrees [10] baseados no uso de árbores de decisión.

Outra categoría adecuada para modelar este problema é a dos algoritmos de aprendizaxe baseados en memoria. Este enfoque utiliza directamente os datos de adestramento almacenados na memoria para realizar predicións ou tomar decisións. En lugar de aprender unha función ou construír un modelo interno durante a fase de adestramento, o sistema consulta os datos de adestramento en tempo real para realizar as operacións necesarias. Isto pode incluír a procura de patróns, a identificación de similitudes ou a clasificación de novos datos baseados na información almacenada previamente na memoria do sistema. Un dos algoritmos máis utilizados nesta categoría grazas á súa eficiencia é kNN (k-Nearest Neighbors) [26]. A filosofía deste algoritmo baséase en utilizar a información dos puntos de datos veciños máis próximos para realizar predicións.

Finalmente, tivéronse en conta os modelos de redes neuronais pola súa capacidade para capturar relacións complexas nos datos e a súa efectividade nunha ampla gama de problemas de aprendizaxe automática. As redes neuronais están inspiradas no funcionamento do cerebro humano. Concretamente, están formadas por capas de unidades chamadas neuronas, que están conectadas entre si mediante conexións ponderadas. Durante a fase de adestramento, os pesos destas conexións axústanse iterativamente para minimizar unha función de perda, permitindo que a rede aprenda a realizar tarefas específicas (clasificación, regresión ou recoñecemento de patróns) a partir dos datos de adestramento. Pese á súa potencia, estes modelos necesitan amplos recursos computacionais, así como unha gran cantidade de datos de adestramento. Neste contexto, optouse por MLP (MultiLayer Perceptron) [1], un modelo máis sinxelo e cunha menor necesidade de recursos computacionais.

3.3. Protocolo experimental

Tal e como se pode observar na figura 2, para garantir uns resultados comparables, reproducibles e realistas, deseñouse un protocolo experimental dividido en tres fases: (i) manipulación de datos, (ii) adestramento de modelos e (iii) validación de modelos.

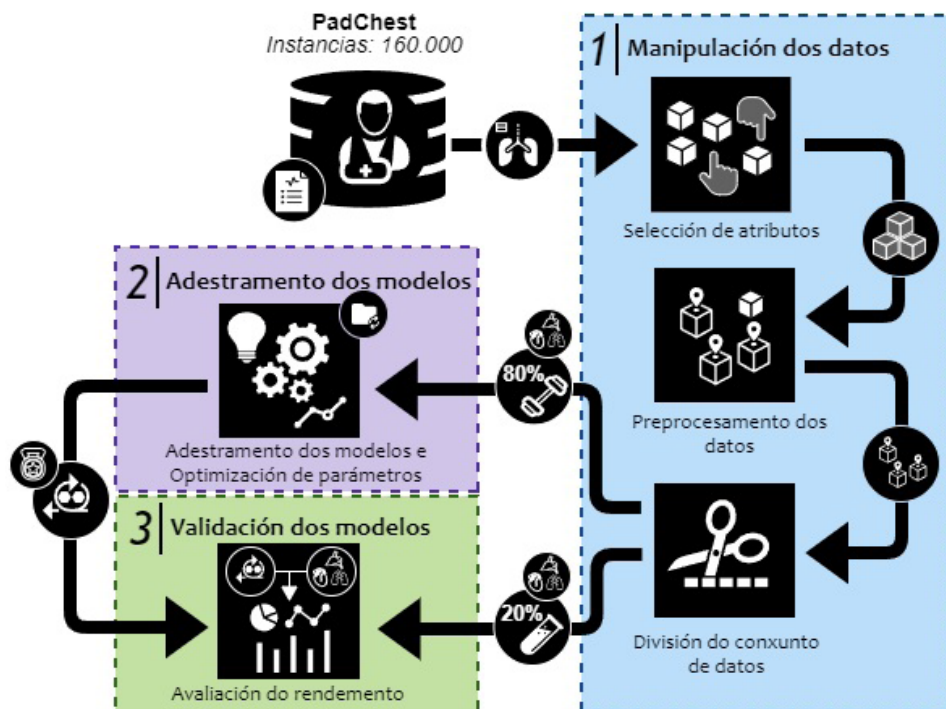


Figura 2. Operativa do protocolo experimental

Na primeira fase realízanse catro tarefas principais: (i) carga do conxunto de datos, (ii) selección dos atributos necesarios para o adestramento e validación dos modelos de aprendizaxe, (iii) uso de técnicas de preprocesamento (normalización, binarización e balanceo de instancias) para mellorar o proceso de adestramento dos modelos e evitar sobreadestramentos, e (iv) división dos datos obtidos en dous subgrupos, un para o adestramento e optimización dos modelos (80 %) e o outro para a avaliación do seu rendemento (20 %).

A segunda fase encárgase das tarefas de adestramento e selección dos mellores modelos de aprendizaxe. Coa finalidade de mellorar a avaliación do rendemento dos modelos e a selección dos hiperparámetros óptimos, utilizouse a combinación das

técnicas *StratifiedKFold Cross-Validation* [25] e *GridSearch* [15]. A técnica *StratifiedKFold Cross-Validation* garante que cada clase no conxunto de datos estea representada de maneira equilibrada en cada conxunto de validación. Isto axuda a obter estimacións máis estables e confiábeis do rendemento do modelo. Doutra banda, *GridSearch* é unha técnica que busca de forma sistemática a combinación óptima de hiperparámetros para o modelo a través dunha procura exhaustiva nunha cuadrícula predefinida. Combinar ambas as técnicas permite unha selección máis informada dos mellores hiperparámetros e evita o sobreaxuste a un só conxunto de datos de validación.

Finalmente, a terceira fase consistiu na medición do rendemento dos modelos de ML previamente adestrados na fase previa. Para iso, empregouse o 20 % do corpus destinado á validación. A táboa 3 mostra a avaliación do rendemento dos diferentes modelos usando as métricas Kappa [8] e ROC [8].

Modelo	Kappa	ROC
RandomForest	0,922949	0,966637
Extra Trees	0,921465	0,965986
Multi Layer Perceptron	0,888696	0,951264
Support Vector Machines	0,894612	0,937164
Bernoulli Naive Bayes	0,865377	0,910956
Multinomial Naive Bayes	0,843977	0,909785
kNN	0,864047	0,908322

Táboa 3. Rendemento obtido por cada modelo de ML na fase de validación

Tal e como se pode ver na táboa 3, RandomForest foi o modelo de aprendizaxe con mellores resultados, seguido moi de preto por ExtraTrees. Isto quere dicir que os modelos de aprendizaxe baseados en árbores son os que mellor se adaptan ao problema que se vai tratar.

A continuación, e coa finalidade de conseguir un modelo máis robusto e cunha maior capacidade de xeneralización do coñecemento, realizouse o readestramento do modelo RandomForest usando a totalidade do corpus (máis instancias para o adestramento).

3.4. Validación clínica

Unha vez construído o modelo final coa totalidade do corpus, fíxose unha validación nun contorno real, no que se compararon os diagnósticos dos facultativos e facultativas co realizado pola aplicación. Concretamente, na actualidade fixéronse só 15 mostras validadas clinicamente e os resultados reflíctense na táboa 4.

Signos	Diag. emitido (%)	Diag. esperado
Cardiom. + Ple. Effusion + Inter. Pattern Retic. Inter. Pattern + Atelectasis	Heart Insuf (98,4 %) Pneumonia (67 %)	Heart Insuf Atyp. Pneumonia
Ple. Effusion + Alv. Pattern + Hilar Cong.	Heart Insuf (99,4 %)	Heart Insuf
Ple. Effusion + Inter. Pattern Ple. Effusion + Inter. Pattern + Infiltrates	Heart Insuf (95,7 %) Pneumonia (97,9 %)	Heart Insuf Atyp. Pneumonia
Flat. Diaph. + Bullas + Vascular Hilar Enlarg	Emphysema (99,4 %)	Emphysema
Flat. Diaph. + Bullas + Hyperinflated Lung	Emphysema (99,9 %)	Emphysema
Art. Aortic Heart Valve + Cardiom. + Ple. Eff.	Heart Insuf (93,6 %)	Heart Insuf
Consol. + Ple. Effusion	Pneumonia (94,9 %)	Pneumonia
Cardiom. + Kerley Lines + Hilar Cong.	Heart Insuf (99,8 %)	Heart Insuf
Consolidation + Al. Pattern Catheter + Atelectasia + Inter. Pattern	Pneumonia (98,5 %) Heart Insuf (97,3 %)	Pneumonia Post Radio. Change
Consol. + Cavitation	Tuberculosis (94,9 %)	Tuberculosis
Consol. + Adenopathy	Pneumonia (95,5 %)	Pneumonia
Consol. + Adenopathy + Atyp. Ple. Thick.	Tuberculosis (91,8 %)	Tuberculosis

Táboa 4. Rendemento obtido por cada modelo de ML na fase de validación

Segundo a descrición da táboa 4, o sistema prognosticou a enfermidade esperada con máis dun 90 % de probabilidade en 12 dos 15 diagnósticos analizados, o que significa un 80 % de efectividade. Considérase relevante ter en conta dous factores: (i) os tres erros cometidos débense a diagnósticos con moi poucas instancias no conxunto de datos inicial, xa que se dá en casos moi específicos e complexos, e (ii) o sistema errou predicindo a «Atyp. Pneumonia» como «Pneumonia». Aínda que son causadas por diferentes tipos de axentes infecciosos e teñen características clínicas e tratamentos distintos, ambas afectan aos mesmos órganos (pulmóns), polo que aínda que o diagnóstico non é correcto, si que pode axudar o facultativo ou facultativa a saber cal é o órgano afectado.

4. Conclusións e traballo futuro

O proxecto permitiu o desenvolvemento dunha ferramenta capaz de (i) determinar automaticamente o diagnóstico máis probable para o ou a paciente a partir dos signos radiolóxicos presentes nas imaxes de raios X e (ii) xerar os informes clínicos específicos para cada paciente. Para isto, deseñouse un protocolo experimental no que se adestraron os modelos de aprendizaxe automática máis adecuados cos datos existentes. Os resultados acadados tanto na fase de avaliación teórica coma clínica demostraron o óptimo desempeño de RandomForest. Non obstante, e pese aos resultados acadados, considérase que a aplicación ten un gran potencial de mellora.

Concretamente, o traballo futuro artículase en dous eixes fundamentais: (i) a mellora continua dos modelos de adestramento e (ii) o recoñecemento e a identificación automática dos signos radiolóxicos presentes nas imaxes de raios X. O primeiro eixe baséase na posibilidade de utilizar outras fontes de información para enriquecer e ampliar a base de coñecementos do sistema, coa finalidade de aumentar a capacidade para recoñecer e clasificar unha maior variedade de signos radiolóxicos cunha mellor precisión. Ademais, propónse o readestramento cada vez que o diagnóstico obtido non concorde co real. Este enfoque de retroalimentación contribuiría á evolución e ao perfeccionamento continuo da aplicación, asegurando a súa eficacia no diagnóstico radiolóxico. Por outro lado, o segundo eixe baséase no uso de ferramentas de aprendizaxe profunda para detectar con precisión a ausencia ou a presenza de signos radiolóxicos. Isto permite realizar un cribado rápido de pacientes, o que redundará nunha maior rapidez no diagnóstico e, polo tanto, unha mellor calidade do sistema asistencial.

5. Disponibilidade e requisitos

Tendo en conta que o ámbito sanitario é crítico, a aplicación encóntrase nunha fase de mellora continua coa finalidade de (i) minimizar os posibles erros e (ii) mellorar a precisión dos diagnósticos emitidos. A aplicación foi deseñada baixo a licenza GPLv3 (*GNU General Public License, version 3*) e está dispoñible para MS Windows e Linux, xa que conta cun arquivo executable para cada un dos sistemas operativos. Os requisitos mínimos son (i) sistema operativo MS Windows 10 ou Linux e (ii) resolución de pantalla de 1920 x 1080.

Pódese acceder ao código da última versión da ferramenta a través do enlace de Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.10680654>.

6. Agradecementos

Este traballo foi parcialmente financiado polo proxecto INOU23-07 da Deputación Provincial de Ourense e pola Consellería de Educación, Universidades e Formación Profesional (Xunta de Galicia) no marco do financiamento estratéxico do grupo de referencia competitiva GRC-ED431C 2022/03.

7. Referencias

- [1] Eric B Baum. 1988. On the capabilities of multilayer perceptrons. *Journal of Complexity* 4, 3 (September 1988), 193–215. [https://doi.org/10.1016/0885-064X\(88\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0885-064X(88)90020-9)
- [2] O. Bodenreider. 2004. The Unified Medical Language System (UMLS): integrating biomedical terminology. *Nucleic Acids Research* 32, 90001 (January 2004), 267D – 270. <https://doi.org/10.1093/nar/gkh061>
- [3] Leo Breiman. 2001. RandomForests. *Machine Learning* 45, 1 (2001), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [4] Jason Brownlee. *Data Preparation for Machine Learning* (1.1 ed.).
- [5] Aurelia Bustos, Antonio Pertusa, Jose-Maria Salinas, and Maria De La Iglesia-Vayá. 2020. PadChest: A large chest x-ray image dataset with multi-label annotated reports. *Medical Image Analysis* 66, (December 2020), 101797. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101797>
- [6] Surabhi Datta and Kirk Roberts. 2020. A dataset of chest X-ray reports annotated with Spatial Role Labeling annotations. *Data in Brief* 32, (October 2020), 106056. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106056>
- [7] Dina Demner-Fushman, Marc D. Kohli, Marc B. Rosenman, Sonya E. Shooshan, Laritza Rodriguez, Sameer Antani, George R. Thoma, and Clement J. McDonald. 2016. Preparing a collection of radiology examinations for distribution and retrieval. *Journal of the American Medical Informatics Association* 23, 2 (March 2016), 304–310. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocv080>
- [8] Peter Flach. 2019. Performance Evaluation in Machine Learning: The Good, the Bad, the Ugly, and the Way Forward. *AAAI* 33, 01 (July 2019), 9808–9814. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33019808>
- [9] Salvador García, Julián Luengo, and Francisco Herrera. 2015. *Data Preprocessing in Data Mining*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>
- [10] Pierre Geurts, Damien Ernst, and Louis Wehenkel. 2006. Extremely randomized trees. *Mach Learn* 63, 1 (April 2006), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1>

- [11]Hani Hagras. 2018. Toward Human-Understandable, Explainable AI. *Computer* 51, 9 (September 2018), 28–36. <https://doi.org/10.1109/MC.2018.3620965>
- [12]Jeremy Irvin, Pranav Rajpurkar, Michael Ko, Yifan Yu, Silvana Ciurea-Ilcus, Chris Chute, Henrik Marklund, Behzad Haghighi, Robyn Ball, Katie Shpanskaya, Jayne Seekins, David A. Mong, Safwan S. Halabi, Jesse K. Sandberg, Ricky Jones, David B. Larson, Curtis P. Langlotz, Bhavik N. Patel, Matthew P. Lungren, and Andrew Y. Ng. 2019. CheXpert: A Large Chest Radiograph Dataset with Uncertainty Labels and Expert Comparison. *AAAI* 33, 01 (July 2019), 590–597. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.3301590>
- [13]Alistair E. W. Johnson, Tom J. Pollard, Nathaniel R. Greenbaum, Matthew P. Lungren, Chih-ying Deng, Yifan Peng, Zhiyong Lu, Roger G. Mark, Seth J. Berkowitz, and Steven Horng. 2019. MIMIC-CXR-JPG, a large publicly available database of labeled chest radiographs. Retrieved February 22, 2024 from <http://arxiv.org/abs/1901.07042>
- [14]Alexandros Karargyris, Satyananda Kashyap, Ismini Lourentzou, Joy Wu, Arjun Sharma, Matthew Tong, Shafiq Abedin, David Beymer, Vandana Mukherjee, Elizabeth A. Krupinski, and Mehdi Moradi. 2020. Creation and Validation of a Chest X-Ray Dataset with Eye-tracking and Report Dictation for AI Development. Retrieved February 22, 2024 from <http://arxiv.org/abs/2009.07386>
- [15]Petro Liashchynskyi and Pavlo Liashchynskyi. 2019. Grid Search, Random Search, Genetic Algorithm: A Big Comparison for NAS. (2019). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1912.06059>
- [16]Jingyu Liu, Jie Lian, and Yizhou Yu. 2020. ChestX-Det10: Chest X-ray Dataset on Detection of Thoracic Abnormalities. Retrieved February 22, 2024 from <http://arxiv.org/abs/2006.10550>
- [17]Henry J. Lowe. 1994. Understanding and Using the Medical Subject Headings (MeSH) Vocabulary to Perform Literature Searches. *JAMA* 271, 14 (April 1994), 1103. <https://doi.org/10.1001/jama.1994.03510380059038>
- [18]Roweida Mohammed, Jumanah Rawashdeh, and Malak Abdullah. 2020. Machine Learning with Oversampling and Undersampling Techniques: Overview Study and Experimental Results. In *2020 11th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, April 2020, Irbid, Jordan. IEEE, Irbid, Jordan, 243–248. . <https://doi.org/10.1109/ICICS49469.2020.239556>
- [19]William S Noble. 2006. What is a support vector machine? *Nat Biotechnol* 24, 12 (December 2006), 1565–1567. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
- [20]Thomas Ploug and Søren Holm. 2020. The four dimensions of contestable AI diagnostics - A patient-centric approach to explainable AI. *Artificial Intelligence in Medicine* 107, (July 2020), 101901. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2020.101901>

- [21] Robin M. Schmidt. 2019. Recurrent Neural Networks (RNNs): A gentle Introduction and Overview. (2019). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1912.05911>
- [22] Maria de la Iglesia Vayá, Jose Manuel Saborit, Joaquim Angel Montell, Antonio Pertusa, Aurelia Bustos, Miguel Cazorla, Joaquin Galant, Xavier Barber, Domingo Orozco-Beltrán, Francisco García-García, Marisa Caparrós, Germán González, and Jose María Salinas. 2020. BIMCV COVID-19+: a large annotated dataset of RX and CT images from COVID-19 patients. Retrieved February 22, 2024 from <http://arxiv.org/abs/2006.01174>
- [23] Xiaosong Wang, Yifan Peng, Le Lu, Zhiyong Lu, Mohammadhadi Bagheri, and Ronald M. Summers. 2017. ChestX-Ray8: Hospital-Scale Chest X-Ray Database and Benchmarks on Weakly-Supervised Classification and Localization of Common Thorax Diseases. In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, July 2017, Honolulu, HI. IEEE, Honolulu, HI, 3462–3471. . <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.369>
- [24] Geoffrey I. Webb. 2011. Naïve Bayes. In *Encyclopedia of Machine Learning*, Claude Sammut and Geoffrey I. Webb (eds.). Springer US, Boston, MA, 713–714. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_576
- [25] Slamet Widodo, Herlambang Brawijaya, and Samudi Samudi. 2022. Stratified K-fold cross validation optimization on machine learning for prediction. *Sinkron* 7, 4 (October 2022), 2407–2414. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i4.11792>
- [26] Shichao Zhang, Xuelong Li, Ming Zong, Xiaofeng Zhu, and Ruili Wang. 2018. Efficient kNN Classification With Different Numbers of Nearest Neighbors. *IEEE Trans. Neural Netw. Learning Syst.* 29, 5 (May 2018), 1774–1785. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2017.2673241>

Coñecendo o clima local: un soporte para a concienciación medioambiental na educación secundaria

M. Vázquez Domínguez,¹ M. Stojanovic,¹ M. J. Valente,²

L. Gimeno Sotelo,¹ e R. Sorí Gómez¹

¹Centro de Investigación Mariña. Environmental Physics Laboratory (EPhysLab)

Universidade de Vigo

²Facultade de Educación e Traballo Social. Universidade de Vigo

martavazquez@uvigo.gal; mstojanovic@uvigo.gal; mvalente@uvigo.gal; luis.gimeno-sotelo@uvigo.gal; robert.sori@uvigo.gal

Resumo

A necesidade de coidar o medio ambiente é incuestionable. Actualmente, isto fíxose vital e imperativo, xa que os efectos negativos da acción humana son evidentes e a contaminación alcanzou un nivel insostible. Neste contexto, a concienciación da poboación máis nova resulta especialmente relevante. Neste traballo preséntanse diferentes propostas que teñen como finalidade a concienciación do alumnado de educación secundaria sobre o cambio climático, ademais de desenvolver competencias en ciencia e tecnoloxía nesta poboación. En primeiro lugar, preséntase unha iniciativa realizada en diferentes centros de ensino secundario da provincia de Ourense, na que se promove a concienciación medioambiental a través de datos reais da contorna dos centros. En segundo lugar, preséntase unha análise multidisciplinar na que se analiza a potencialidade das ciencias do clima para desenvolver competencias en ciencia e tecnoloxía e propóñense actividades con este fin.

Palabras clave: cambio climático, educación e concienciación medioambiental

1. Análise do clima local coma base para a concienciación medioambiental

As observacións históricas de estacións de medición globais e reconstrucións da composición da atmosfera indican que as actividades humanas aumentaron nos últimos anos as concentracións atmosféricas de gases de efecto invernadoiro, as cales teñen unha influencia decisiva no quecemento climático [1]. A temperatura da superficie global nas dúas primeiras décadas do século XXI (2001-2020) foi 0,99 °C máis alta ca no período de 1850-1900, aumentando máis rapidamente desde 1970 ca en calquera outro período de cincuenta anos durante polo menos os últimos 2000 anos [2]. Isto resultou nun proceso progresivo de cambio climático, que se reflicte nos cambios observados nas precipitacións, na ocorrencia de eventos extremos como secas e inundacións, nos impactos na biodiversidade, na produción agrícola e nas actividades socioeconómicas en xeral [2]. O estudo das precipitacións e a súa variabilidade nunha rexión é un dos campos de estudo máis importantes das ciencias climáticas debido ás súas implicacións sociais e económicas [3]. Galicia (composta por catro provincias: Pontevedra, Ourense, A Coruña e Lugo) está situada no extremo noroeste da península ibérica (PI) e representa a parte máis chuviosa da PI [4]. Caracterízase por un alto gradiente de temperatura, evapotranspiración e precipitacións desde a costa de Galicia cara á zona montañosa do interior con precipitacións que oscilan entre os 900 mm/ano na costa e os 2500 mm/ano nalgúns puntos da zona montañosa [5]. Debido a que os acuíferos galegos dependen en gran medida da recarga pluvial, cun almacenamento específico relativamente baixo e tempos de residencia curtos para as augas subterráneas, as condicións climáticas, como o réxime de precipitacións e as futuras secas, son especialmente relevantes para determinar a cantidade de recarga e a dispoñibilidade de augas subterráneas durante todo o ano [6].

Galicia está limitada polo océano Atlántico Norte e polo mar Cantábrico, o que implica unha elevada influencia oceánica no clima das zonas costeiras e adxacentes [7, 8], con veráns suaves e invernos chuviosos; con todo, o interior da rexión caracterízase por un clima continental, con veráns secos e invernos fríos [9]. Esta rexión comunmente vese impactada por ciclóns extratropicais [10, 11] e sistemas dinámicos [12] que permiten a posibilidade de episodios de fortes precipitacións. Ademais, a advección de masas de aire frío e húmido do océano Atlántico Norte caracteriza frecuentemente a súa estación outonal [13]. Estudos previos tamén demostraron que a variabilidade

das precipitacións e das temperaturas está influenciada por modos de variabilidade climática como a oscilación do Atlántico Norte (NAO, polas súas siglas en inglés) e tamén polo fenómeno El Niño-oscilación do Sur (ENSO) [7, 14, 15]. Por outra banda, Sorí *et al.* [16] sinalaron que as secas hidrolóxicas están controladas principalmente por condicións secas e húmidas a escalas temporais curtas e de medio a longo prazo, cunha marcada influencia durante os meses de choiva (decembro-abril).

A continuación preséntase unha iniciativa desenvolta no ano 2023, na que a análise de datos meteorolóxicos reais da provincia de Ourense serven como base para deseñar e realizar charlas divulgativas en centros de ensino secundario co fin de concienciar o alumnado sobre o cambio climático.

1.1. Análise do clima na provincia de Ourense

1.1.1. Datos e metodoloxía

Para este estudo, utilizáronse datos diarios de precipitacións, temperatura media, temperatura máxima e temperatura mínima que permiten a caracterización de eventos extremos de precipitacións e temperaturas na provincia de Ourense. Estes datos foron extraídos da Unidade de Observación e Predición Meteorolóxica (Meteogalicia). Meteogalicia naceu no ano 2000 e ten como obxectivos principais a realización dunha predición meteorolóxica de Galicia e a explotación e o mantemento da rede de observación meteorolóxica e climatolóxica da Xunta de Galicia (<http://www.meteogalicia.es>). Seleccionáronse un total de 18 estacións meteorolóxicas localizadas na provincia de Ourense (A Mezquita, Baltar, Carballeda de Valdeorras (Lardeira), Castrelo de Miño, Castro Caldelas, Celanova, Coles, Entrimo, Larouco, Leiro, Maceda-Rodicio, Cabeza de Manzaneda, As Petarelas-Rubiá, Ourense, Verín-Vilamaior, Viana do Bolo, Vilariño de Conso e Xinzo) distribuídas homoxeneamente na rexión considerando a súa situación e a dispoñibilidade temporal de datos (figura 1). O período temporal que se analizou varía debido á diferente dispoñibilidade da fonte de datos (entre 11 e 21 anos). Realizouse unha análise estatística xeral destes datos mediante a análise de tendencias nas series temporais, mediante o estudo de frecuencias e estatísticas de distribución das series de datos. As análises de tendencias obtéñense mediante regresión lineal, medindo a significatividade e tendo en conta o p-valor [17].

1.1.2. Resultados

A continuación móstranse os resultados obtidos para as diferentes estacións da provincia de Ourense.

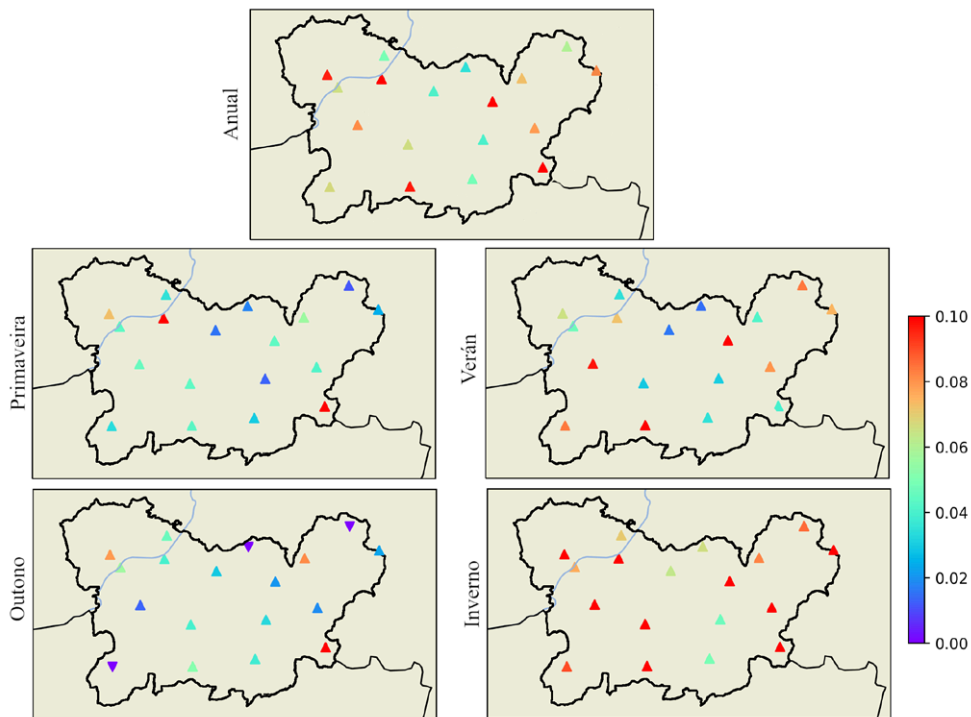


Figura 1. Tendencia observada para as distintas estacións da provincia de Ourense a escala anual e estacional na temperatura media

Na figura 1 móstrase a tendencia observada para a temperatura media, tanto a nivel anual (panel superior) coma a análise estacional (paneis inferiores). Nesta figura as tendencias positivas indícanse coas frechas orientadas cara arriba, mentres que as tendencias negativas se indican coas frechas orientadas cara abaixo. A tendencia anual está realizada a través dos valores mensuais, mentres que os resultados estacionais representan o valor medio para os meses de marzo-maio (primavera), xuño-agosto (verán), setembro-novembro (outono) e decembro-febreiro (inverno). En xeral, obsérvanse tendencias positivas tanto a nivel anual coma a nivel estacional. Só durante o outono se poden observar algunhas estacións con tendencia negativa (17% das estacións). As tendencias resultan significativas no inverno, cando se presentan

os valores máis elevados superiores ao 0,10 °C/ano na maior parte das estacións. A temperatura mínima e máxima mostra tamén tendencias positivas xeneralizadas, aínda que cabe destacar a tendencia negativa na temperatura mínima que ocorre no verán ao sur da provincia (resultados non mostrados).

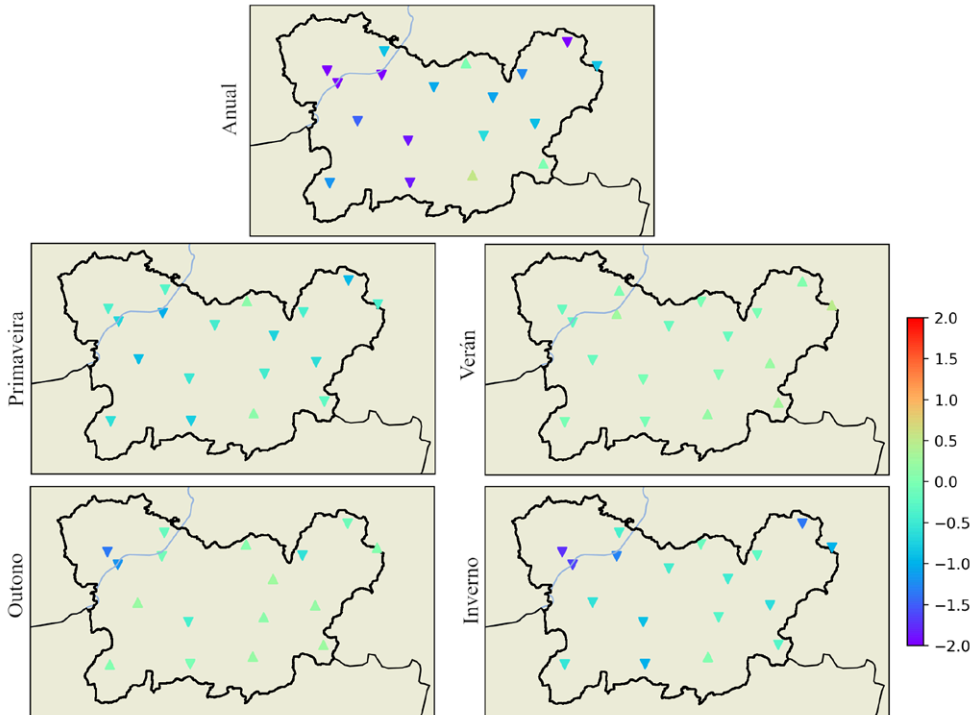


Figura 2. Tendencia observada para as distintas estacións da provincia de Ourense a escala anual e estacional no número de días con precipitacións entre 0 e 15 l/m²

Con respecto ás precipitacións, nas figuras 2 e 3 móstrase a evolución no número de días con precipitacións entre 0 e 15 l/m² e 15 e 30 l/m², respectivamente. No caso das precipitacións de menor intensidade, obsérvase en xeral unha tendencia negativa na maior parte das estacións de observacións analizadas. En escala anual, só no sueste se observan dúas estacións con tendencia positiva. Similares resultados obtéñense no resto da análise estacional. Só no caso do outono se pode observar unha cantidade considerable de estacións con tendencia positiva no leste da provincia.

Con respecto ás precipitacións de maior intensidade, na figura 3 obsérvase un padrón máis irregular ca nas outras variables analizadas. A nivel anual obsérvanse

tendencias positivas na maior parte das estacións, aínda que case un 30 % das estacións presentan unha tendencia negativa e os valores non son moi elevados. Unha situación similar obsérvase para os resultados do inverno. Nas estacións cálidas as tendencias son, en xeral, positivas pero con valores máis suavizados. Finalmente, no outono existe o mesmo número de estacións con tendencia positiva e negativa.

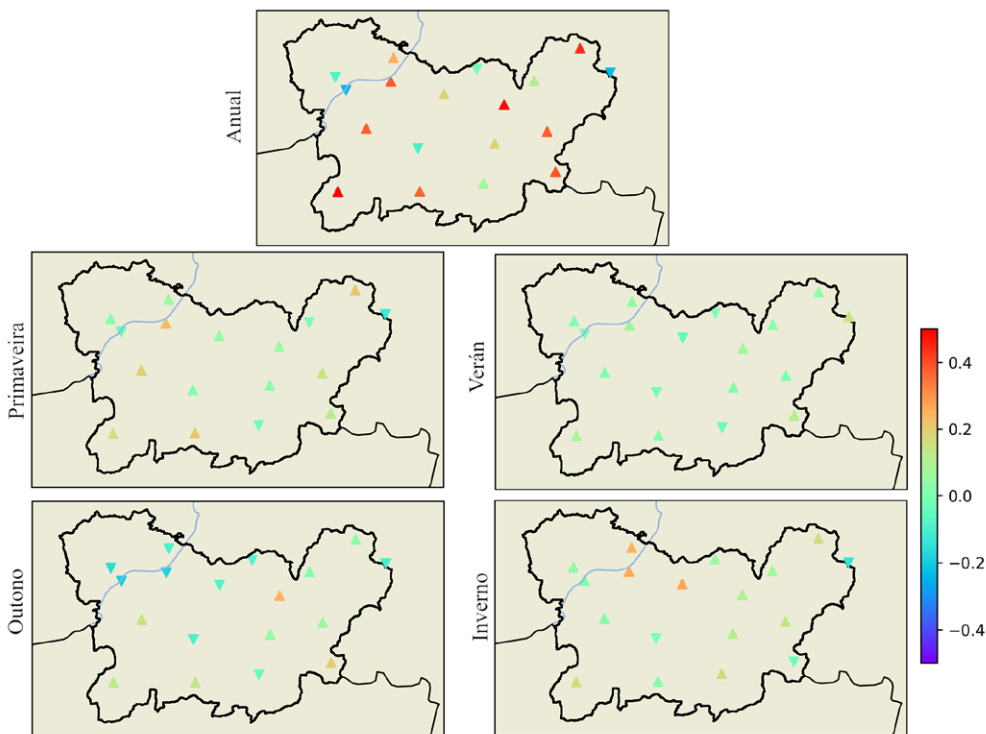


Figura 3. Tendencia observada para as distintas estacións da provincia de Ourense a escala anual e estacional no número de días con precipitacións entre 15 e 30 l/m²

Dos resultados aquí mostrados pódense extraer algunhas conclusións relevantes, as cales poden resultar de interese para concienciar o alumnado de educación secundaria sobre o cambio climático. Con respecto á temperatura, evidénciase o aumento desta en toda a provincia e en todas as estacións. Por outro lado, no caso das precipitacións, parece que as precipitacións de menor intensidade están a diminuír a súa frecuencia; non obstante, esta aumenta para as intensidades superiores. Isto pode suxerir que a ocorrencia de eventos extremos de precipitacións está a aumentar.

1.2. Deseño de charlas para a concienciación medioambiental

1.2.1. A historia do clima

A primeira parte da charla divulgativa consiste na situación do alumnado no contexto de cambio asociado ao sistema climático. Así, realízase unha revisión ao longo dos principais cambios no clima durante toda a historia do noso planeta. Nesta parte, o alumnado sitúase inicialmente hai 4,5 millóns de anos na formación da Terra e na súa atmosfera primixenia, na que as temperaturas eran duns 2000 °C e cunha elevada cantidade de gases de efecto invernadoiro, especialmente dióxido de carbono (CO₂) [18]. A aparición das primeiras bacterias no noso planeta resulta de grande importancia na historia do noso clima. A través dos procesos da fotosíntese as bacterias comezan a converter parte do CO₂ en osíxeno libre [19], o que diminúe a capacidade da atmosfera para reter calor. Así, o noso planeta vaise arrefriando pouco a pouco (ao longo de miles de millóns de anos) ata chegar a converterse nunha gran bóla de neve a -45 °C [20]. O planeta permanece neste estado ata que o interior da Terra, aínda composto por lava incandescente, consegue abrir camiño liberando CO₂ ao seu paso e volvendo temperar o clima millóns de anos despois. A época dos dinosauros tamén resulta de interese para entender a variabilidade climática e como esta lle pode afectar ao resto do planeta. Os dinosauros habitaron a terra durante 165 millóns de anos [21], tempo no que a situación climática foi cambiando afectada, por exemplo, pola deriva continental. A pesar de que os dinosauros tiñan as situacións propicias para dominar o planeta, a súa extinción está intimamente relacionada co clima. Aínda que existen diferentes teorías sobre a causa inicial da súa extinción, o aumento de CO₂ xunto á redución da enerxía solar entrante parecen ser os causantes da extinción masiva [22]. Outro proceso que cómpre resaltar para os alumnos é a era das glaciacións. A primeira glaciación iniciouse hai 2,5 millóns de anos e dende entón estas levan sucedéndose [23]. Na ocorrencia destes fenómenos existen diferentes ingredientes implicados. Por un lado, a distribución continental do noso planeta, con importantes rexións terrestres situadas preto dos polos, favorece a acumulación de neve sobre estas rexións; neve que se produce derivada da gran cantidade de humidade dispoñible nesta rexión. Por outro lado, existe un fenómeno astronómico que ocorre cada 100 000 anos e que pode desencadear unha glaciación. A posición de Xúpiter e de Saturno, que se produce con esa frecuencia, aféctalle á órbita terrestre producindo veráns frío e invernos cálidos [24]. Os invernos cálidos favorecen a

evaporación e a ocorrencia de precipitacións en forma de neve, mentres que os veráns fríos evitan que a neve e o xeo acumulado se derreta. Así, pouco a pouco a cobertura de neve vai aumentando un proceso de retroalimentación no que o maior albedo da neve (porcentaxe de radiación solar reflectida pola superficie terrestre) fai que as temperaturas vaian diminuindo.

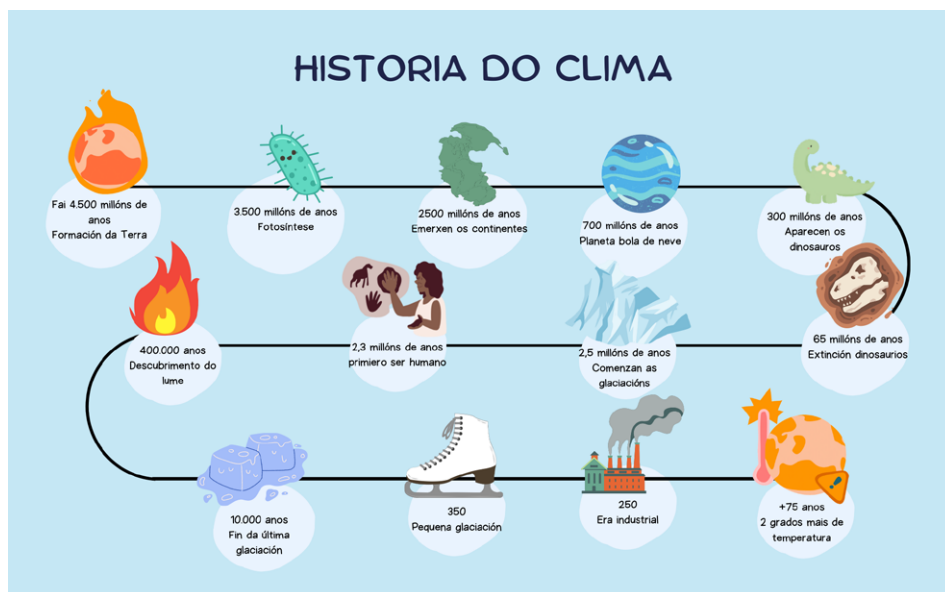


Figura 4. Liña temporal deseñada para realizar as charlas nos centros

O pensamento histórico consiste nun conxunto de habilidades que permiten o procesamento da información do pasado [25]. Estas habilidades permítenlle ao alumnado entender como o presente é diferente do pasado [26]. A pesar de que o pensamento histórico está xeralmente asociado coa ensinanza das materias de historia, esta habilidade está intimamente relacionada co pensamento crítico e pode ser desenvolto en moitas outras materias [27]. O pensamento cronolóxico é a habilidade dentro do pensamento histórico relacionado cos conceptos de tempo, cambio e continuidade, e como establecer datas dende o pasado ata o presente [28]. As liñas temporais son unha ferramenta de utilidade, a cal pode mellorar o desenvolvemento desta habilidade e o entendemento das secuencias de ocorrencia en eventos históricos ou, neste caso, climáticos.

Tendo isto en conta, e para facilitar a situación do alumnado nos contidos explicados, deseñouse unha liña temporal na que se resumen os principais eventos climáticos que se produciron no noso planeta. A situación do alumnado na liña do tempo resulta especialmente relevante. Aínda que o sistema climático é un sistema en continuo cambio e no cal se levan sucedendo situacións drasticamente diferentes, é importante para a rapazada entender a frecuencia de cambio experimentada polo clima no pasado para que poidan chegar a entender a velocidade de cambio observada no cambio climático actual. Na figura 4 móstrase a liña do tempo deseñada para realizar esta actividade.

1.2.2. Reconstruíndo o clima

A segunda parte das charlas achega o alumnado á investigación climática. Este apartado ten como finalidade que o alumnado entenda como é posible reconstruír o clima e as metodoloxías principais para estudalo. En primeiro lugar, a paleoclimatoloxía é a ciencia que permite o estudo do clima na época anterior aos instrumentos de medida. Esta ciencia baséase na análise das pegadas da natureza creadas no clima pasado, chamadas «proxies» [29]. Dous exemplos son a información climática recollida dos aneis das árbores ou das testemuñas de xeo extraídas dos grandes glaciares. No caso dos aneis das árbores, cada un dos aneis observables no interior das árbores corresponde a un ano distinto, mentres que o seu grosor pode falarnos da temperatura e da humidade nese ano. A información dos aneis das árbores permitiu unha das primeiras identificacións do cambio climático actual. Grazas á información recollida neles foi posible reconstruír unha serie de temperatura dende hai máis de 1000 anos. Así puido constatarase como entre os anos 1000 e 1900 a temperatura mostraba un comportamento máis ou menos estable. Non obstante, a partir de 1900 a temperatura comeza a mostrar un crecemento constante [30]. No caso das testemuñas de xeo, estes son bloques de xeo que poden ser extraídos das zonas que presentan xeo perpetuo. Na extracción destas testemuñas poden observarse diferentes capas que, ao igual ca no caso dos aneis das árbores, permiten identificar os diferentes anos. En cada unha das capas de xeo almacénanse burbullas de aire que constitúen rexistros temporais do clima e da composición da atmosfera ao longo do tempo. No ano 2004 conseguíuse unha testemuña de xeo de lonxitude e calidade suficientes para analizar a variación do clima dende hai 800 000 anos. A través da información destas testemuñas de xeo púidose analizar como foi a variación do CO₂ durante o período de rexistro. Así,

constatouse que o rexistro máximo deste gas ata a época moderna era de 298 partes por millón (ppm) e atópase actualmente por enriba de 400 ppm [31].

Na actualidade existen diferentes formas para obter datos climáticos en tempo real. Ao longo do noso planeta existe unha ampla rede de estacións de observación meteorolóxica, as cales rexistran diferentes variables con diferente resolución temporal. Non obstante, a súa distribución espacial non é homoxénea e depende moito da rexión do planeta onde nos atopemos. Outra fonte de datos meteorolóxicos son os satélites. Estes están dotados de diferentes sensores que recollen a radiación electromagnética que emite ou reflicte a terra e os gases atmosféricos, e transmíteos ás estacións terrestres para o seu procesamento e análise por meteorólogos. Os datos do satélite permiten unha caracterización espacial máis homoxénea das características meteorolóxicas. Destas dúas fontes, así como doutras diferentes, podemos obter información sobre o clima máis recente, o cal se pode interpretar a través da análise estatística.

Así, para exemplificar esta análise e ilustrar o cambio climático na provincia de Ourense, preséntase un exemplo analizando os datos de precipitacións e de temperaturas presentados na sección anterior correspondentes a unha das estacións das seleccionadas para o estudo. Neste traballo móstrase para a estación de montaña de Manzaneda, aínda que na realización das charlas se tratou de adaptar a estación a aquela que resultase máis representativa para o centro educativo. No caso das temperaturas, realízase unha análise de tendencias presentada na figura 5, mentres que no caso das precipitacións se combina unha análise de frecuencias coa análise de tendencias análogo ao caso anterior mostrado na figura 6. Con respecto á temperatura, a figura 5 presenta a evolución da temperatura media para a estación seleccionada tanto en escala mensual coma para o inverno. No primeiro caso, a variación anual dificulta a identificación da tendencia, aínda que en ambas as gráficas a liña de tendencia (liña representada en cor vermella) mostra un incremento paulatino na temperatura media ao longo do período.

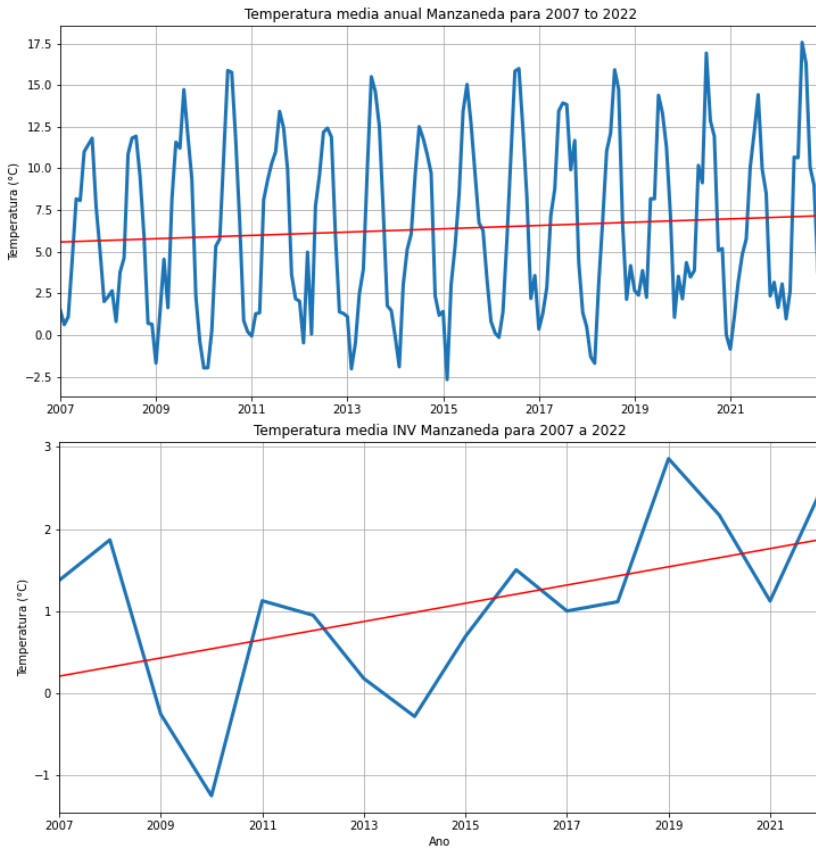


Figura 5. Panel superior: evolución mensual da temperatura media na estación de Manzaneda para o período 2007-2022. Panel inferior: evolución anual da temperatura media na estación de Manzaneda para o inverno no período 2007-2022. As liñas vermellas representan a tendencia da serie

Na figura 6 móstrase a análise para as precipitacións. Na figura 6a preséntase o histograma correspondente a esta estación. Este gráfico representa a frecuencia de ocorrencia (en número de días) de precipitacións de diferentes rangos de intensidade (en l/m^2). Podemos ver como as precipitacións de menos intensidade son as máis frecuentes. Para analizar como variaron as precipitacións asociadas ao cambio climático actual pode resultar especialmente interesante a tendencia nesta frecuencia de ocorrencia para diferentes rangos, de maior e menor intensidade. Isto é o que se analiza nas figuras 6 b) e c). A figura 6 b) mostra a evolución na frecuencia de ocorrencia de eventos de precipitacións de menor intensidade (0 a $15 l/m^2$), mentres que a figura 6 c) mostra a evolución para eventos de maior intensidade (15 - $30 l/m^2$). Pódese observar

como nesta estación as precipitacións de menor intensidade son cada vez menos frecuentes, mentres que as de maior intensidade foron aumentando ao longo do período.

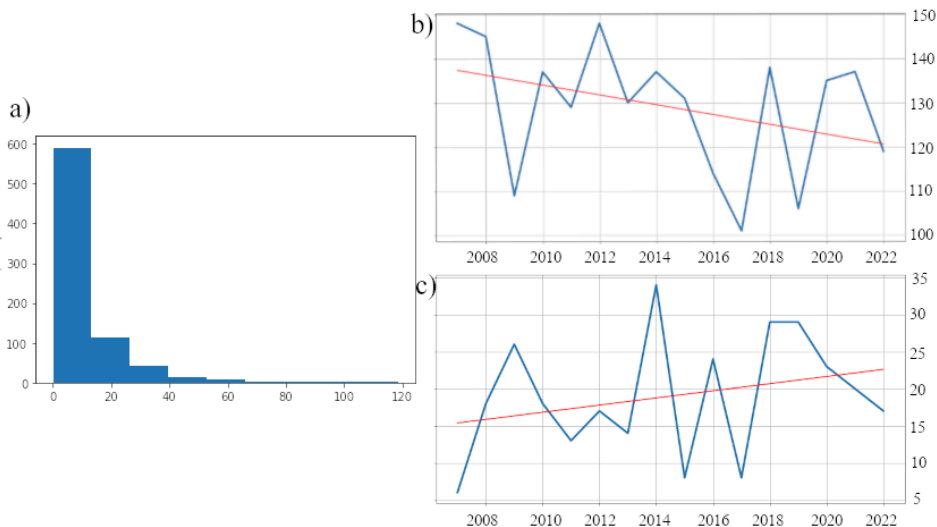


Figura 6. a) Histograma das precipitacións na estación de Manzaneda; b) e c) Evolución anual dos números de días con eventos de precipitacións de intensidade (0-15] l/m² e (15-30] l/m², respectivamente

Ademais da análise do clima pasado, os modelos de proxección climática serven para analizar como pode evolucionar o clima nos próximos anos segundo diferentes consideracións. Estas proxeccións estiman que, de seguir a tendencia actual, para finais de 2100 o aumento da temperatura media do planeta será 1,5 °C superior á observada en 1850 [32].

1.2.3. Causas e consecuencias

Por último, unha vez estudado o cambio climático, é hora de analizar as causas dos cambios observados e as consecuencias que estes poden ter. En canto á causa, existe un consenso en atribuír estes cambios á actividade humana, especialmente ligada ao uso de combustibles fósiles. A emisión de gases de efecto invernadoiro por parte do ser humano xa comeza hai 400 000 anos cando o ser humano comeza a consumir madeira como fonte de enerxía [33]. Non obstante, o impacto non comeza a ser significativo ata a era industrial, na que comeza a realizarse o uso masivo de combustibles fósiles para xerar enerxía. Os combustibles fósiles supoñen reservas de carbono que se formaron

hai 300 millóns de anos e que se liberan á atmosfera nun período de tempo moi breve [34]. A revolución industrial supón, á súa vez, un grande impulso para a evolución do ser humano, creando as situacións propicias para que a poboación total se dispare. Isto supón unha maior demanda enerxética que dispara a produción e, polo tanto, as emisións.

O aumento de emisións de gases de efecto invernadoiro nos últimos anos ten unha consecuencia evidente no aumento da temperatura observada no apartado anterior, pero as consecuencias van máis alá. O aumento da temperatura ten implicacións claras na cobertura de xeo do noso planeta. Actualmente, no planeta existen diferentes glaciares, incluso na zona do ecuador. As maiores masa de xeo terrestre atópanse na Antártida e en Groenlandia, formados por neve que comezou a caer ao inicio das glaciacións hai milleiros de anos. Nalgúns puntos o grosor do xeo ten máis de tres quilómetros, mais cada ano a capa de xeo é un pouco máis fina [35]. Por outro lado, no Polo Norte atopamos xeo mariño. Existe unha rexión no centro do océano Ártico no que o xeo é perenne e se mantén durante todo o ano. Noutras rexións, non obstante, prodúcese unha formación de xeo e de desxeo estacional. Nos últimos anos estase observando como a extensión de xeo perenne é cada vez menor [36].

Un dos efectos máis comentados do cambio climático no océano é o aumento do nivel do mar debido ao desxeo. Pero esta non é a única causa do aumento. A partir de 4 °C a auga aumenta o seu volume, e a partir de aquí cada grao adicional incrementa este aínda máis [37]. A temperatura dos océanos está aumentando drasticamente; nos últimos anos estanse a romper os récords de temperatura media global dos océanos. Isto ten importantes consecuencias, xa que os océanos son importantes sumidoiros CO₂. Ao aumentar a temperatura dos océanos, diminúe a capacidade de absorción de CO₂ por parte destes [38], co inevitable efecto nas concentracións de gases de efecto invernadoiro.

Nos últimos tempos estanse a suceder nos xornais as novas sobre eventos de precipitacións extremas. Aínda que non se poida asegurar que o cambio climático sexa a súa causa, o que si resulta evidente é que a temperatura terá unha grande influencia na ocorrencia de tormentas. Ao aumentar a temperatura do aire, a súa capacidade para conter vapor de auga tamén aumenta e favorece a magnitude das tormentas. No caso da formación de furacáns, o aumento das temperaturas tamén lle afectará á súa formación, xa que estes sistemas precisan temperaturas mínimas de 27 °C para

formarse [39]. Canto maior sexa a temperatura do mar, máis fácil será a súa formación e poden chegar a ter unha forza maior. En xeral, espérase que o aumento da temperatura faga o clima máis extremo (zonas húmidas máis húmidas e as secas máis secas), e agrave as secas e as inundacións.

2. As ciencias do clima como ferramenta vehicular no desenvolvemento de competencias STEAM

A necesidade de coidar o medio ambiente é incuestionable. Actualmente, isto fíxose vital e imperativo, xa que os efectos negativos da acción humana son evidentes e a contaminación alcanzou un nivel insostible.

Neste contexto alarmante, as Nacións Unidas (ONU) presentaron a axenda de desenvolvemento sostible en 2015. Entre outros obxectivos, entenden a protección do planeta e a prosperidade para todos e todas como algúns dos obxectivos que cómpre acadar en quince anos e, así, contribuír a un mellor mundo máis xusto e sostible para 2030. A axenda 2030 establece a acción polo clima como un dos obxectivos que hai que tratar na sociedade actual, e a educación e a sensibilización para a mitigación do cambio climático será unha das metas específicas [40]. Neste contexto, a poboación máis nova resulta especialmente relevante na abordaxe destes obxectivos e na futura protección do noso planeta.

Por iso, nun contexto de crise ambiental, especialmente de cambio climático, é necesario que as respostas sociais sexan consensuadas e favorezan a implicación de toda a cidadanía. Este compromiso global sería, polo tanto, a base potencial para unha transformación que conduza a un cambio positivo. A educación ambiental, en concreto a relacionada co cambio climático, debería ir moito máis alá das campañas ou actividades de educación ambiental en contextos de aprendizaxe non formal [41]. Un enfoque curricular interdisciplinar deste tema é esencial ao longo do itinerario académico individual. Para iso, a actuación do profesorado de diferentes disciplinas contribuiría en gran medida a estimular situacións de aprendizaxe sobre o cambio climático e a promover accións conducentes ao desenvolvemento sostible, entendido como aquel capaz de «satisfacer as necesidades do presente sen comprometer as necesidades das xeracións futuras» [42].

Na esfera educativa, o cambio climático está integrado explicitamente no currículo educativo no ámbito nacional [43] e no currículo tanto de educación secundaria [44]

coma de bacharelato [45] na comunidade galega. Non obstante, Navarro-Díaz *et al.* [41] sinalan a falta de énfase que se lle dá ao tema do cambio climático nos libros de texto españois da ESO. Só aparece con certa énfase en «Ciencias aplicadas á actividade profesional», «Xeografía e historia» e «Cultura científica», a pesar de considerar que «Tecnoloxía» ou «Física e química» poderían incrementar o número de referencias presentadas. Suárez-López *et al.* [46] recomendan que se trate no contexto da ética ou da filosofía. Por outra banda, o feito de que as diferentes dimensións do asunto se traten en distintas materias pode dificultar que o alumnado adquira unha visión completa do problema [47]. Por este motivo resulta interesante o desenvolvemento de iniciativas que proporcionen unha idea básica completa do clima e do cambio climático.

Ademais da indubidable importancia do cambio climático na concienciación e na sensibilización da poboación máis nova, as ciencias do clima poden resultar un vehículo de grande utilidade para traballar competencias xerais no alumnado. Mais alá das competencias no pensamento histórico comentadas no apartado anterior, as ciencias do clima e da atmosfera están intimamente relacionadas con competencias en ciencia e en tecnoloxía. Nos seguintes apartados revisaremos algunhas propostas para traballar este tipo de competencias no alumnado de educación secundaria.

2.1. As ciencias do clima no ensino secundario e o desenvolvemento de competencias en ciencia e tecnoloxía

2.1.1. As ciencias do clima nas matemáticas

A gran cantidade de datos existentes en ciencias do clima e a elevada facilidade de comprensión das variables meteorolóxicas fundamentais (temperaturas, precipitacións, velocidade do vento etc.) permiten aplicar con facilidade técnicas do ámbito das matemáticas e da estatística. Entre outras utilidades, pódese ver como as variables evolucionan no tempo ou a relación existente entre elas. Este tipo de análise pode encadrarse, dentro do currículo de matemáticas correspondente á educación secundaria, nos cursos de terceiro e cuarto, relacionado cos contidos de sentido estocástico. O sentido estocástico inclúe a análise e a interpretación de datos, a elaboración de conxecturas e a toma de decisións baseadas en información estatística, a súa avaliación crítica e a comprensión e comunicación de fenómenos aleatorios nunha gran variedade de situacións cotiás [43-45].

Para ilustrar estas ideas, presentamos agora un exemplo real, unha análise de datos da estación meteorolóxica de Manzaneda, en Ourense. Ao utilizar datos diarios desde 2007 ata 2022 de precipitacións, temperaturas mínimas, temperaturas máximas e temperaturas medias (obtidos de MeteoGalicia: <https://www.meteogalicia.gal/observacion/rede/redelIndex.action>), estudáronse as estatísticas descritivas, obtivéronse os gráficos usuais de visualización de variables e levouse a cabo unha detección de tendencias e un estudo da relación entre variables.

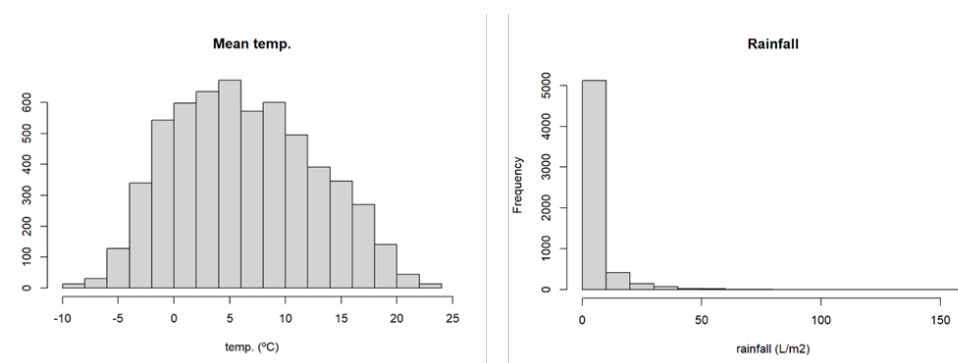


Figura 7. Histogramas das temperaturas medias (esquerda) e das precipitacións (dereita) de Manzaneda no período 2007-2022

En canto ás estatísticas descritivas, é sinxelo obter o mínimo, o máximo, a mediana, a media e a desviación típica das variables. Para visualizar as variables, unha ferramenta moi útil son os histogramas, que son gráficos que indican a frecuencia de valores por intervalos. Na figura 7 represéntase o histograma das temperaturas medias e das precipitacións na estación meteorolóxica de Manzaneda, no que se manifesta claramente a simetría das temperaturas medias e a asimetría das precipitacións.

Unha vez realizada unha análise preliminar das variables, pódense aplicar modelos de regresión lineal para identificar se as variables crecen ou decrecen co tempo. Consisten en axustar unha recta de regresión ($y = a + bt$), onde y é a variable estudada, t é o tempo, a é a ordenada na orixe e b é a pendente da recta. A figura 8 mostra o gráfico da temperatura media de Manzaneda, no que aparece representada a recta de regresión, cunha tendencia claramente positiva (o coeficiente b , que é o da pendente desa recta). Isto significa que a medida que pasou o tempo, a temperatura media de Manzaneda aumentou, o que é consistente co quecemento global.

Os modelos de regresión tamén se poden utilizar para identificar as relacións existentes entre dúas variables. Neste caso, a recta de regresión sería $y = a + bx$, onde x sería outra das variables estudadas (a variable y sería a variable dependente, é dicir, depende dos valores que x toma, que é a variable independente). Na figura 9 represéntase o gráfico da temperatura máxima de Manzaneda en función da temperatura mínima (é dicir, a variable y sería a temperatura máxima e a variable x , a temperatura mínima). Vese claramente unha tendencia positiva na gráfica (o coeficiente b é claramente positivo), o que indica que hai unha relación de dependencia entre as variables (canto maior é a temperatura mínima, maior é a temperatura máxima), o cal é fisicamente congruente.

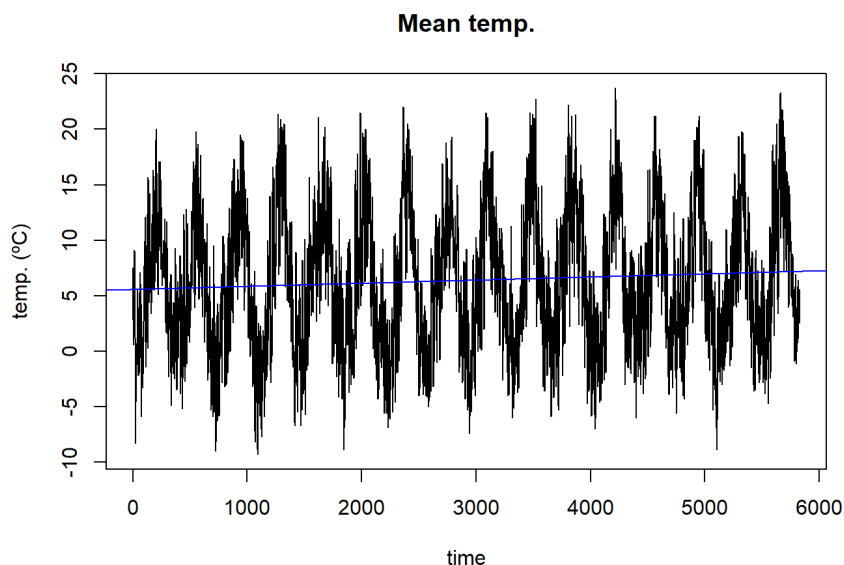


Figura 8. Serie temporal da temperatura media de Manzaneda no período 2007-2022 con recta de regresión en azul

A análise estatística presentada é unha análise simple que mostra a facilidade na que os datos climáticos poden ser utilizados para ilustrar técnicas simples que se poden estudar na educación secundaria e no bacharelato nas materias do ámbito das matemáticas, e que á súa vez lle permite ao estudantado comprender mellor as características climáticas do medio no que viven.

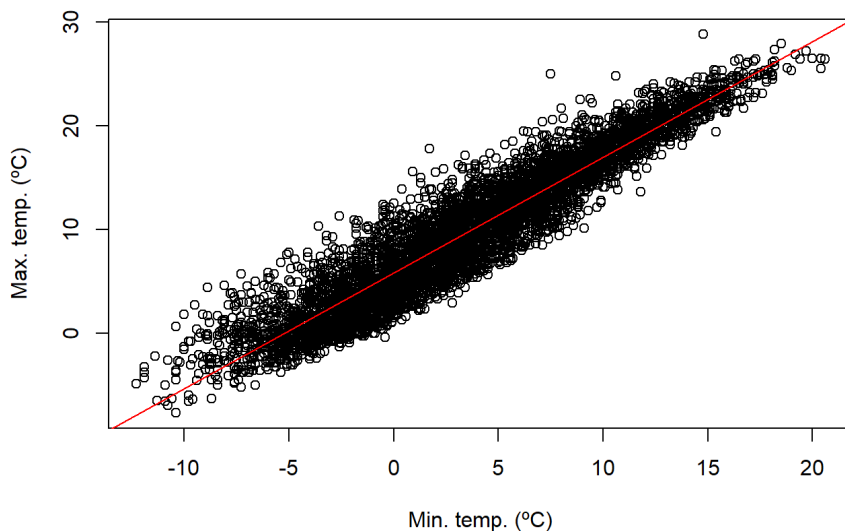


Figura 9. Representación gráfica de temperatura máxima de Manzaneda no período 2007-2022 en función da temperatura mínima nese período, con recta de regresión en vermello.

2.1.2. *As ciencias do clima nas ciencias experimentais*

Dentro das ciencias experimentais as ciencias poden relacionarse con diferentes materias e conceptos. No caso da materia de Física e química, os procesos que se producen na atmosfera teñen a súa base en conceptos físicos e químicos. Por unha banda, o balance radiativo do planeta e os cambios observados no clima teñen a súa base na composición química da atmosfera. Os procesos físico-químicos ligados ao efecto invernadoiro resultan a base fundamental para comprender o cambio climático actual e a súa orixe. O cambio climático ten un efecto evidente no medio ambiente, o cal se pode observar nos océanos (por exemplo, a través de cambios na temperatura e acidificación), nos ecosistemas (como a ocorrencia de secas e inundacións) ou nos animais, plantas ou humanidade (con efectos que van dende a extinción dalgunhas especies ata os efectos na saúde). Todos estes temas resultan de especial relevancia en diferentes materias da educación secundaria, como Bioloxía e xeoloxía ou Ciencias da Terra e do medio ambiente.

A dinámica atmosférica e a súa influencia na meteoroloxía e climatoloxía baséanse en procesos físicos que poden facilmente relacionarse con contidos específicos da materia de Física e química, como por exemplo o concepto de presión. A continuación

preséntase un exemplo no que se poden utilizar as ciencias atmosféricas para asimilar o concepto de presión. Este concepto pode traballarse na materia de Física e química de 4.º curso de educación secundaria dentro do bloque 4, nos contidos referentes ás «forzas e presións nos fluídos» segundo o currículo da comunidade autónoma de Galicia. O concepto de presión atmosférica explorárase así a través deste experimento no que o alumnado entenderá o seu efecto na ocorrencia de precipitacións.

A presión atmosférica nun punto é o peso da columna de aire que se alza sobre esa unidade de superficie. Así resulta evidente que a presión diminúise coa altitude, ao ir diminuíndo progresivamente a cantidade do aire por riba. Pero ademais da vertical, na horizontal a presión non é homoxénea. Na superficie, por exemplo, existen pequenas variacións na presión atmosférica a nivel local, o que provoca sistemas de altas e baixas presións que modulan a meteoroloxía. Estas variacións de presión asóciáanse xeralmente con diferenzas de temperatura e son as responsables da formación de nubes que posteriormente poden chegar a producir as precipitacións.



Figura 10. Esquema do experimento para a análise da presión atmosférica e a influencia no clima

Para realizar o experimento precisaremos un matraz (ou botella de vidro), un insuflador, un tapón e alcohol. Estes elementos actúan no experimento da seguinte maneira: o matraz, xunto co aire que contén, actuará como a nosa atmosfera, o alcohol representará a auga involucrada no proceso de formación das nubes e o tapón servirá para illar a nosa atmosfera do aire circundante. Finalmente, o insuflador servirá para producir as variacións de presión na nosa atmosfera, conectando con ela a través dun pequeno orificio no tapón. A montaxe inicial do experimento será a seguinte: o primeiro paso será introducir alcohol dentro do matraz e espaxelo polo seu interior. Este alcohol representará a auga presente na atmosfera. Emprégase alcohol, xa que se evapora con moita facilidade e este feito resulta moi útil para obter «vapor de alcohol», que será o que forme realmente a nube na súa condensación. A continuación, pechamos o sistema a través do tapón mentres o mantemos conectado ao insuflador.

Con esta montaxe o que intentaremos será exemplificar como as variacións entre altas e baixas presións afectan á nosa atmosfera e ao tempo que observamos. En primeiro lugar, o que provocaremos é unha situación de anticiclón, que é unha situación de altas presións. Nestas condicións as temperaturas adoitan ser máis elevadas e os ceos permanecen despexados. Para conseguir a situación de anticiclón o que faremos será introducir aire dentro da nosa atmosfera, o que producirá o aumento de presión. Neste punto o alumnado non poderá observar nada aínda, non obstante este proceso é indispensable para realizar o experimento. Ao aumentar a presión, conseguimos tamén un aumento da temperatura que contribúe a que o alcohol se evapore e impregne o matraz. Polo tanto, obteremos unha atmosfera cargada en «vapor de auga». Neste punto pasamos a exemplificar a situación contraria, a borrasca, a cal se relaciona con ceos encapotados e coa ocorrencia de precipitacións. Para conseguir unha borrasca o que faremos é diminuír de novo a presión; para iso só será necesario extraer o tapón e producirase un descenso brusco da presión e da temperatura. Ao diminuír a temperatura o que se produce é un proceso de condensación que resulta facilmente observable na figura 10. Este proceso realízase de maneira moi brusca, o que resulta especialmente rechamante para a rapazada, que adoita quedar abraiada. Unha vez obtida a nosa nube, podemos volver á situación de anticiclón introducindo de novo aire na atmosfera. Así, neste caso, o alumnado poderá observar como ao aumentar a presión (e, polo tanto, a temperatura) a nube que acabamos de formar disíbase rapidamente.

2.1.3. As ciencias do clima na tecnoloxía

Finalmente, as ciencias do clima resultan unha ferramenta potencial tamén na tecnoloxía. Existen multitude de conceptos, especialmente os relacionados coa obtención de datos meteorolóxicos, os cales encádranse perfectamente nesta especialidade. Os satélites, por exemplo poden resultar interesantes con respecto á súa medición de variables climáticas. Por outro lado, os sensores e os instrumentos de medición meteorolóxica, que permiten a obtención de datos de observacións, tamén resultarán interesantes. Neste apartado presentaremos un exemplo no que o alumnado se aproximará a obter datos meteorolóxicos mentres desenvolven competencias en tecnoloxía e en programación.

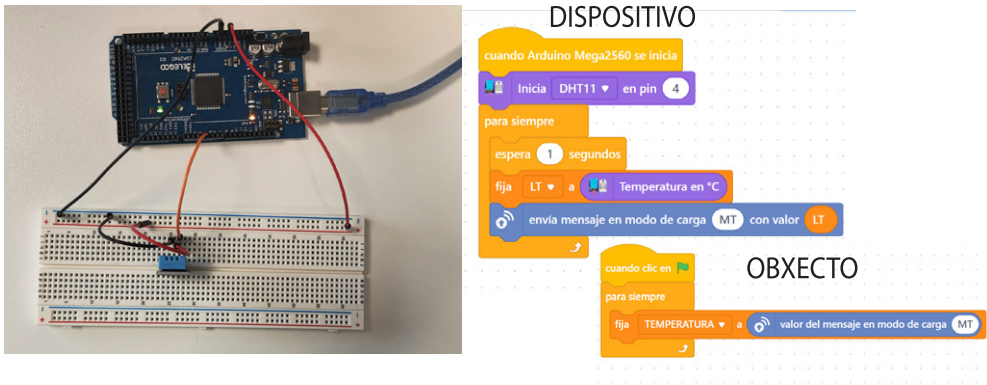


Figura 11. Representación da montaxe do sistema de medición da temperatura e da humidade, e un exemplo da súa programación

A actividade proposta consiste en elaborar unha estación meteorolóxica a través da montaxe e programación dun sistema a través de Arduino. Para realizar a actividade necesitaremos un Arduino Uno (ou placa similar), un ordenador, un sensor DHT11 de temperatura e humidade, unha placa de probas e diferentes cables de conexión. En primeiro lugar, realízase a montaxe do sistema Arduino, conectando este ao sensor a través da placa de probas e dos conectores. Esta montaxe pode apreciarse na figura 11. Unha vez realizada a montaxe do sistema do sensor, o Arduino conéctase ao ordenador co fin de poder programar a lectura dos valores da temperatura e da humidade. Para este fin utilízase unha linguaxe de programación por bloques para facilitarlle a programación ao alumnado. Este tipo de programación baséase no deseño do programa a través de bloques con funcións prefixadas que se poden

ir conectando uns aos outros e configurar a secuencia de instrucións completa. Así non é necesario que o alumno ou alumna saiba ningunha linguaxe de programación concreta, senón que é suficiente con que entenda a lóxica do programa. Debido á relativa complexidade da programación, o profesor ou profesora actuará de guía para realizar este proceso. Existen numerosos programas que permiten programar por bloques un sistema Arduino, por exemplo Scratch for Arduino (S4A), ou incluso simular o seu comportamento, por exemplo Tinkercad. Nesta actividade propoñemos o uso de mBlock para realizar a actividade. A principal vantaxe deste sistema é a súa versatilidade. Ademais de permitir a programación de Arduino, pódense programar diferentes sistemas de control e de robótica, polo que pode resultar interesante para outro tipo de actividades na aula de tecnoloxía. Por outro lado, presenta dúas formas de uso. Ademais da aplicación de escritorio, a cal se instala nun ordenador de maneira local, tamén dispón dunha versión en liña que non necesita rexistro para o seu uso e é especialmente útil para os centros que non dispoñen de correos institucionais ou que estean especialmente comprometidos coa protección de datos.

No panel dereito da figura 11 móstrase un exemplo do código desenvolto en mBlock para a lectura da temperatura a través do sensor. Para realizar o programa, así como para obter o valor da temperatura no propio ordenador, foi necesaria a instalación das extensións «DHT11 e DHT22 NODO» e «Cargar en modo difusión». En primeiro lugar, temos que cargar o sensor, indicando o pin no que temos este conectado á placa Arduino. A continuación, programamos unha lectura automática da temperatura (ou da humidade) cada certo período de tempo (neste caso, 1 segundo). Esta programación realízase na pestana «dispositivo» do programa. Despois, programamos a comunicación entre o Arduino (dispositivo) e o programa (obxecto). Na pestana «obxecto» é na que teremos que configurar a mostra dos valores por pantalla.

A través desta actividade, o alumnado é capaz de tomar mostras de datos meteorolóxicos. Ademais das variables de temperatura e de humidade, o sistema podería completarse con outro tipo de sensores para ter unha caracterización máis completa das variables meteorolóxicas con datos, por exemplo, de presión ou de precipitacións.

Esta actividade pode ser o punto de partida da realización de propostas multidisciplinares máis completas no que se analice o clima. A toma de datos pode

manterse no tempo, máis alá do propio momento de realización da actividade. Esta toma de datos pode ser directamente realizada polo alumnado, cunha periodicidade mínima diaria, promovendo neles o espírito emprendedor e a independencia e organización. A toma de datos supón un compromiso por parte do alumnado, que ten que ter en conta a hora na que toman os datos, estar pendentes de posibles erros na medida ou revisar que o sistema continúe a funcionar correctamente. As bases de datos tomadas polo propio alumnado pode empregarse para análises climáticas que se poden aplicar noutras materias. Por exemplo, os valores de presión atmosférica poden usarse para identificar o paso de borrascas explicadas con anterioridade.

Ademais, no caso de manterse a actividade no tempo e chegar a ter series longas, estas poden tratarse estatisticamente, como no caso da actividade proposta na aula de matemáticas, e poden ligarse os resultados coa análise do cambio climático. A observación deste fenómeno a través de datos reais recollidos polo propio alumnado pode ser o punto de partida na análise e na interpretación dos efectos actuais e posibles desta situación. Este proceso de análise, xunto co resto de actividades propostas neste traballo, favorece a concienciación medioambiental do alumnado, á vez que desenvolve o seu pensamento crítico.

2.2. Proxectos internacionais para a innovación educativa

A relevancia de impulsar actividades educativas interdisciplinares para o desenvolvemento das *soft skills* nos contextos educativos actuais, unida á urxencia da acción docente no contexto das cuestións ambientais, en especial do cambio climático, fai da metodoloxía de traballo por proxectos un excelente enfoque metodolóxico para implantar nos centros educativos. Neste sentido, os proxectos eTwinning son unha iniciativa da Comisión Europea, apoiada polos estados membros, que lles permiten aos centros educativos europeos impulsar un contorno de aprendizaxe dixital, capaz de establecer asociacións, que fomenten o traballo colaborativo, desde unha perspectiva internacional. Para iso, existe unha plataforma colaborativa en liña, un espazo de traballo común denominado Twinspace e foros onde se pode avanzar en proxectos educativos nos máis diversos ámbitos. Deste xeito, os proxectos eTwinning constitúen unha oportunidade de innovación que as comunidades educativas deben coñecer e

participar, enriquecendo as oportunidades formativas das novas xeracións, tamén no que se refire ao cambio climático ou ás ciencias do clima en xeral.

No ámbito da formación inicial do profesorado xa existen experiencias que dan a coñecer estes escenarios educativos que, ademais de favorecer o bo uso dos recursos TIC, as asociacións

educativas europeas lles introducen ás e aos futuros docentes na metodoloxía de traballo por proxectos (aprendizaxe baseada en proxectos-ABP).

A modo de exemplo da aplicabilidade deste tipo de proxectos ligados á concienciación medioambiental e ao cambio climático, a continuación móstrase unha proposta de proxecto elaborado no ámbito da materia de Deseño de investigación e propostas innovadoras en ciencias experimentais do Mestrado de educación secundaria obrigatoria, bacharelato, formación profesional e ensinanzas de idiomas. Especialidade: Ciencias experimentais. Matemáticas e tecnoloxía realizada no curso 2023/2024.

A proposta de actividade consiste en deseñar e en presentar un proxecto de innovación educativa, no ámbito da iniciativa europea eTwinning, para desenvolver cun mínimo de tres socios europeos, durante un curso escolar. O proxecto debe ser multidisciplinar, integrado no currículo e, polo tanto, desenvolver competencias adecuadas a cada ciclo educativo, así como aos valores prioritarios da Unión Europea. A presentación utiliza a seguinte estrutura: introdución, descrición do contexto (fortalezas, debilidades, oportunidades, limitacións, necesidades...), obxectivo principal, obxectivos específicos, proceso, produto final, membros, coordinación, etapas/temporalización, descrición das actividades en cada etapa (produtos finais de cada etapa-responsable da etapa), comunicación (interna, externa, recursos e temporalización), avaliación, medidas de continencia, produto final e difusión.

Nun dos proxectos presentados, o alumnado centrouse nos seguintes temas: auga limpa e saneamento, enerxía segura e non contaminada, produción e consumo responsable, acción climática, vida submarina e vida dos ecosistemas terrestres. O obxectivo xeral foi estudar o impacto da contaminación na auga da rede pública de abastecemento e na auga do río. Conscientes de que o compromiso activo coa estabilidade forma parte das competencias clave do sistema educativo español, o alumnado deseñou unha secuencia de actividades interdisciplinares que se

desenvolverán entre tres centros europeos, nas materias de Bioloxía e xeoloxía, Tecnoloxía, e Física e química de 4.º ESO. Para o futuro profesorado «Este tipo de proxectos fomenta a participación activa do alumno para mellorar o contorno da súa contorna ao mesmo tempo que realiza a aprendizaxe mediante a investigación e o descubrimento. Realizaranse actividades conxuntas entre os distintos centros e a elaboración de materiais de promoción de sensibilización social.» Con isto, procurarase que o alumno ou alumna avance na consecución das competencias clave establecidas na LOMLOE: competencia en comunicación lingüística (CCL), competencia plurilingüe (CP), competencia matemática e científica, tecnoloxía e enxeñaría (STEM), competencia dixital (CD), competencia persoal, social e para aprender a aprender (CPSAA), competencia cidadá (CC), competencia emprendedora (CE), competencia en conciencia e expresións culturais (CCEC). O proxecto divídese nas seguintes fases:

- Reunión inicial entre o profesorado responsable para concretar a planificación temporal e as saídas de campo para recoller mostras de auga fluvial.
- Deseño para realizar diferentes exposicións de auga. O profesor ou profesora de Física e química falará de como se pode detectar a contaminación na auga e os parámetros que se poden medir para estimar a calidade da auga.
 - Análise da auga para determinar a contaminación.
 - Montaxe do sensor (Arduino Mini, empregaríase un sensor TDS, que analiza a calidade da auga segundo o número de sólidos solubles presentes en ppm. Sensores de auga: entre os parámetros a medir estarían salinidade, sólidos en suspensión, pH etc.).
 - Avaliación.
 - Divulgación.

3 Agradecementos

Marta Vázquez Domínguez e Milica Stojanovic agradecen o apoio da Xunta de Galicia a través do financiamento para realizar a súa etapa posdoutoral a través das bolsas ED481D-2022-020 e ED481B-2021/134, respectivamente. Rogert Sorí agradécelle ao Ministerio de Ciencia, Innovación e Universidade o apoio posdoutoral a través do contrato RYC2021-034044-I.

4 Referencias

- [1] Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., et al. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth System Science Data*, 15(6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.
- [2] IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- [3] Collier, G.C., Krzysztofowicz, R. (2000). Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239, 1–338. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00389-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00389-9)
- [4] Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T.J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S., Esteban-Parra, M.J. (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24(8), 925–944. <https://doi.org/10.1002/joc.1048>
- [5] Raposo, J.R., Molinero, J., Dafonte, J. (2012). Parameterization and quantification of recharge in crystalline fractured bedrocks in Galicia-Costa (NW Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1667–1683. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1667-2012>
- [6] Raposo, J. R., Dafonte, J., Molinero, J. (2013). Assessing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia-Costa, Spain. *Hydrogeology Journal*, 21(2), 459–479. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0922-7>
- [7] Lorenzo, M.N., Taboada, J.J., Iglesias, I., Gómez-Gesteira, M. (2010a). Predictability of the spring rainfall in Northwestern Iberian Peninsula from sea surfaces temperature of ENSO areas. *Climate Changes*, 107, 329–341. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9991-6>
- [8] Lorenzo, M.N., Iglesias, I., Taboada, J.J., Gómez-Gesteira, M. (2010b). Relationship between monthly rainfall in Northwest Iberian Peninsula and North Atlantic Sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 30(7), 980–990. <https://doi.org/10.1002/joc.1959>
- [9] Gómez-Gesteira, M., Gimeno, L., deCastro, M., Lorenzo, M.N., Alvarez, I., Nieto, R., Crespo, A.J.C., Ramos, A.M., Taboada, J.J., Santo, F.E., Barriopedro, D., Trigo, I.F. (2011). The state of climate in NW Iberia. *Climate Research*, 48, 109–144. <https://doi.org/10.3354/cr00967>
- [10] Trigo, I. F. (2006). Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 26, 127–143. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0065-9>
- [11] Pérez-Alarcón, A., Fernández-Álvarez, J. C., Sorí, R., Liberato, M.L.R., Trigo, R.M., Nieto, R., Gimeno, L. (2023). How much of precipitation over the Euroregion Galicia – Northern Portugal is due to tropical-origin cyclones?: A Lagrangian approach. *Atmospheric Research*, 285, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106640>

- [12] Nieto, R., Gimeno, L., De la Torre, L., Ribera, P., Barriopedro, D., García-Herrera, R., Serrano, A., Gordillo, A., Redaño, A., Lorente, J. (2007). Interannual variability of cut-off low systems over the European sector: The role of blocking and the Northern Hemisphere circulation modes. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 85–101. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0222-7>
- [13] Valero, F., Martín, M.L., Sotillo, M.G., Morata, A., Luna, M.Y. (2009). Characterization of the autumn Iberian precipitation from long-term datasets: comparison between observed and hindcasted data. *International Journal of Climatology, A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29 (4), 527–541. <https://doi.org/10.1002/joc.1726>
- [14] de Castro, M., Lorenzo, N., Taboada, J.J., Sarmiento, M., Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M. (2006). Influence of teleconnection patterns on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula). *Climate Research* 32(1), 63–73. <https://doi.org/10.3354/cr032063>
- [15] Ramos, A.M., Lorenzo, M.N., Gimeno, L. (2010). Compatibility between modes of low-frequency variability and circulation types: A case study of the northwest Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 115, D02113. <https://doi.org/10.1029/2009JD012194>
- [16] Sorí, R., Vázquez, M., Stojanovic, M., Nieto, R., Liberato, M.L.R., Gimeno, L. (2020). Hydrometeorological droughts in the Miño–Limia–Sil hydrographic demarcation (northwestern Iberian Peninsula): the role of atmospheric drivers. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1805–1832. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1805-2020>
- [17] Wilks, D. S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. In *International geophysics series*, (pp 1-649), 2nd Edn., Academic Press, Amsterdam, Boston. <https://sunandclimate.files.wordpress.com/2009/05/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences-0127519661.pdf>
- [18] Armstrong, E., Farnsworth, A., Lauretano, V., Witkowski, C. (2022). Understanding the Climate of Ancient Earth. *Frontiers Young Minds*, 10, 684983. <https://doi.org/10.3389/frym.2022.684983>
- [19] Fischer, W. W., Hemp, J., Johnson, H. J. (2016). Evolution of Oxygenic Photosynthesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 647-683. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054810>
- [20] Hoffman, P. F., Schrag, D. P. (2000). Snowball Earth. *Scientific American*, 282(1), 68-75. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0100-68>
- [21] Gu, T. H. (2020) Ecological Mechanism of Dinosaur Extinction. *American International Journal of Biology and Life Sciences*, 2(1), 1-5. <https://doi.org/10.46545/aijbls.V2I1.56>
- [22] Bond, D. P. G., Grasby, S. E. (2017). On the causes of mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478, 3-29. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.11.005>
- [23] Maslin, M. (2020). Tying celestial mechanics to Earth's ice ages. *Physics Today*, 73 (5), 48–53. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4474>

- [24] Sorokhtin, O. G., Chilingar, G. V., Sorokhtin, N. O., Liu, M., Khilyu, M. F. (2015). Jupiter's effect on Earth's climate, *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4091–4097. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3694-7>
- [25] Trombino, D. L., Bol, L. (2012). Historical Thinking. In: Seel, N.M. (eds) *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp.1430-1432) Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_1074
- [26] Thorp, R., Persson, A. (2020). On historical thinking and the history educational challenge. *Educational Philosophy and Theory*, 52(8), 891-901. <https://doi.org/10.1080/00131857.2020.1712550>
- [27] Maxwell, M. (2019). Historical Thinking Skills: A Second Opinion. *Social Education*, 83(5) 290-295. <https://futurefocusedhistory.files.wordpress.com/2019/10/nccs-article-102019-1.pdf>
- [28] Akbaba, B. (2020). Investigation of Chronological Thinking Skills of Secondary School Students and Development of These Skills Based on Grade Level. *Education and Science*, 45(203) 215-229. <https://doi.org/10.15390/eb.2020.8631>
- [29] Bradley, R.S. (2011). High-resolution paleoclimatology. In: M.K. Hughes, T.W. Swetnam and H.F. Diaz (eds). *Dendroclimatology: Progress and Prospects. Developments in Paleoenvironmental Research 11*, Springer, Berlin, 3-15. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-5725-0_1
- [30] Mann, M. E., Gille, E., Overpeck, J., Gross, W., Bradley, R. S., Keimig, F. T., Huges, M. (2000). Global Temperature Patterns in Past Centuries: An Interactive Presentation. *Earth Interactions*, 4(4), 1-29. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2000\)004<0001:GTPIPC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2000)004<0001:GTPIPC>2.3.CO;2)
- [31] Dlugokencky, E., Tans, P. (2016). Trends in atmospheric carbon dioxide. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/
- [32] IPCC: 2018. Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C*. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- [33] Ruddiman, W, F. (2003). The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* 61(3), 261-293. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f>
- [34] Berner, R. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426 (6964), 323-326 <https://doi.org/10.1038/nature02131>
- [35] Croll, J., Sugden, D. (2021). On the thickness of the Antarctic ice, and its relations to that of the glacial epoch. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 112(3-4), 1-8. <https://doi.org/10.1017/S1755691021000050>
- [36] Comiso, J. C. (2022). A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 29 (20), 17-1 17-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015650>

- [37] Fung, F., Lopez, A., New, M. (2011). Water availability in +2°C and +4°C worlds. *Philosophical Transactions A*, 369(1934), 99-116. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0293>
- [38] Hurd, C.L., Lenton, A., Tilbrook, B. et al. (2018). Current understanding and challenges for oceans in a higher-CO2 world. *Nature Climate Change*, 8, 686-694. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0211-0>
- [39] Galvin, J. F. P. (2008) The weather and climate of the tropics: Part 7—Tropical revolving storms. *Weather*, 63, 327-333. <https://doi.org/10.1002/wea.252>
- [40] Sustainable Development Strategy 2030. <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/documentos/eds2030-english.pdf>
- [41] Navarro-Díaz, M., Moreno-Fernández, O., & Rivero-García, A. (2020). El cambio climático en los libros de texto de educación secundaria obligatoria. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 25(87), 957-985.
- [42] Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo. Asamblea General de Las Naciones Unidas, A/42/427.
- [43] Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217/con>
- [44] DECRETO 156/2022, de 15 de septiembre, por el que se establecen la ordenación y el currículo de la educación secundaria obligatoria en la Comunidad Autónoma de Galicia. https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2022/20220926/AnuncioG0655-190922-0002_gl.pdf
- [45] DECRETO 157/2022, de 15 de septiembre, por el que se establecen la ordenación y el currículo del bachillerato en la Comunidad Autónoma de Galicia. https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2022/20220926/AnuncioG0655-190922-0003_es.html
- [46] Suárez-López, R., & Eugenio-Gozalbo, M. (2021). How is sustainability addressed in primary and secondary education curricula? Assessing the cases of Spain and Portugal. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 31(2), 106-122. <https://doi.org/10.1080/10382046.2021.1924498>
- [47] M. Vázquez. Sensores de medición meteorológica: Actividade na aula de tecnoloxía. Trabajo de Fin de Master. Máster Universitario en Profesorado 25 en ESO, Bacharelato, FP e Ensinanza de Idiomas. Especialidade: Tecnoloxía. Universidade de Vigo, 2021.

Proxectos INOOU 2023

Vicerreitoría do
Campus de Ourense

Universidade de Vigo