

Universidad Peruana Cayetano Heredia



FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFÍA

Construcción de modelos de aprendizaje automático químicamente interpretativos en la clasificación de moléculas de colorantes naturales de celdas solares sensibilizadas por tintes basados en relaciones estructura-propiedad

Proyecto de tesis

Autor:

Bach. Dan Santivañez Gutarra

Asesora:

Dra. María Quintana Caceda

Co-Asesores:

Dr. Anthony Huamán Aguirre

Lima - Perú

2022

Índice

1. Introducción	3
1.1. Problemática	3
1.2. Justificación	8
1.3. Antecedentes	9
2. Hipótesis de investigación y objetivos	11
2.1. Hipótesis de investigación	11
2.2. Objetivos	11
3. Marco Teórico	11
3.1. Celdas solares sensibilizadas por tintes (CSPT)	11
3.1.1. Componentes de las CSPT	11
3.1.2. Funcionamiento de las CSPT	11
3.1.3. Tipos de sensibilizantes	11
3.2. Colorantes naturales	11
3.2.1. Características físicas y químicas	11
3.2.2. Familias de colorantes naturales usados como sensibilizantes	11
3.3. Enfoque de investigación direccionado por datos	11
3.3.1. Tipos de enfoques de investigación en química	11
3.3.2. Tipos de estructuras de datos en química	11
3.3.3. Extracción y preprocesamiento de datos	11
3.3.4. Tratamiento de datos	11
3.3.5. Descubrimiento y análisis de características	11
3.3.6. Entrenamiento y evaluación de modelos	11
3.3.7. Validadores estadísticos de los modelos	11
3.4. Modelos de aprendizaje automático	11
3.4.1. Naturaleza de los modelos de aprendizaje automático	11
3.4.2. Interpretatividad de los modelos de aprendizaje automático	11
3.4.3. Clasificadores clásicos	11
3.4.4. Clasificadores ensamblados	11
3.4.5. Evaluadores de los resultados de clasificación	11
4. Materiales y métodos	11
4.0.1. Extracción de datos	11
4.0.2. Preprocesamiento de datos	11
4.0.3. Descubrimiento y análisis de características	11
4.0.4. Entrenamiento y evaluación del modelo 1	11
4.0.5. Entrenamiento y evaluación del modelo 2	11
4.0.6. Entrenamiento y evaluación del modelo 3	11
4.0.7. Comparación de modelos	11
4.1. Análisis estadístico	11
4.1.1. Pruebas de normalidad	11
5. Referencias bibliográficas	12
6. Cronograma de trabajo	14
7. Presupuesto y financiamiento	14

Resumen

Las celdas solares son dispositivos que convierten energía lumínica en energía eléctrica útil a través de fenómenos electroquímicos. El desarrollo de materiales sostenibles y con mayor eficiencia es un reto de investigación y también ambiental, ya que resolverlo conlleva explorar miles de millones de compuestos y hallar dicho tipos de materiales favorecerían el consumo de energías limpias. Esta exploración requiere recursos humanos y materiales que muchos investigadores no pueden proporcionarse, es entonces que las simulaciones computacionales y el enfoque dirigido por datos cobran importancia. El uso de experimentos *in silico* han ...

1. Introducción

1.1. Problemática

La dependencia de los combustibles fósiles traería consigo problemas como la inseguridad energética y el incremento de la temperatura global a causa del aumento de los gases de efecto invernadero. Las sociedades que concentran la producción de los combustibles fósiles podrían controlar geopolítica y económicamente a otras [1], esta inseguridad energética se evidenció en la crisis del petróleo de 1973 [2] y en la disputa entre Rusia y la Unión Europea por el suministro de gas en este año [3]. En contraste, el problema del incremento de la temperatura global es un problema mediáticamente más discreto pero no menos alarmante. Tanto así que, en el 2018, la *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) emitió un informe sobre los impactos que causaría dicho incremento en 1.5°C con respecto a los niveles preindustriales para el 2040, que en resumidas cuentas, se prevé un detrimento crítico y sin retorno de la civilización y la biósfera [4]. A fin de hacer frente a estos problemas, la transición hacia una matriz energética mundial donde predominen fuentes energéticas menos contaminantes y descentralizadas es la solución.

Las fuentes renovables reúnen dichas características, por lo que muchos gobiernos y organizaciones han tomado acciones para aprovecharlas. En ese marco, la *International Renewable Energy Agency* (IRENA) realizó un análisis multisectorial en el 2020 donde propuso una hoja de ruta para que las energías renovables generen el 86 % de la electricidad global [5]. En ese documento también se menciona que esta cifra no se alcanzaría sin la investigación ni el desarrollo de tecnologías que aprovechen dichas fuentes para hacerlas sostenibles y comercialmente viables.

Hace un año, la energía hidroeléctrica generó más de 4 mil tera-vatios por hora (TWh) en el mundo, lo que representó más del 50 % de la generación de todas las renovables [7]. No obstante, no es posible extender la construcción de centrales hidroeléctricas dado que muchas comunidades no cuentan cuencas hidrográficas o caídas de agua que puedan aprovecharse. Sin contar esta fuente, las energías eólica y solar son las que encabezan la producción energética. Con el propósito de contextualizar el crecimiento del uso de estas fuentes renovables geográfica y temporalmente se muestra la Figura 1. En ella se visualizan los porcentajes de potencia consumida provenientes de tres grupos de fuentes renovables no hidroeléctricas: La eólica, solar y otras (*GeoBiomasaOtros*). Estos porcentajes se distribuyen desde el 2012 hasta el 2021 y se comparan las tendencias en el Perú, Sudamérica y el mundo. Se aprecia el aumento del consumo energético de la eólica y solar sobre las demás, y de entre estas dos, la eólica es mayor. No obstante, también es evidente que la energía solar ha tenido un crecimiento sostenido en el tiempo y esto se debe, entre otras razones, a la disponibilidad de nuevas tecnologías más comercial y ambientalmente más viables que aprovechan la luz solar.

Existen dos tipos de tecnologías solares: La termosolar y la fotovoltaica [8]. En la primera se usa la energía térmica de un fluido calentado por concentradores solares para generar electricidad por medio del movimiento de turbinas conectadas a generadores electromagnéticos. Pese a los esfuerzos por reducir los costos de construcción y mantenimiento de las centrales termosolares, solo países con alta demanda energética industrial y la geografía apta pueden hacer rentables estas tecnologías [9].

En contraste a la termosolar, en la fotovoltaica se aprovecha directamente la radiación solar mediante fenómenos fotoeléctricos y de transporte de cargas, mimetizando la fotosíntesis. Si las plantas tienen a las células con clorofila en sus hojas como sus unidades generadoras de energía, en los sistemas fotovoltaicos estas serían las células o celdas solares. La estructura de una celda solar depende de los mecanismos de generación eléctrica y transporte de carga, y estos a su vez, de la naturaleza de los materiales donde suceden estos mecanismos. El interés por desarrollar tecnologías fotovoltaicas se da por dos razones: Por su versatilidad, es decir que pueden ser

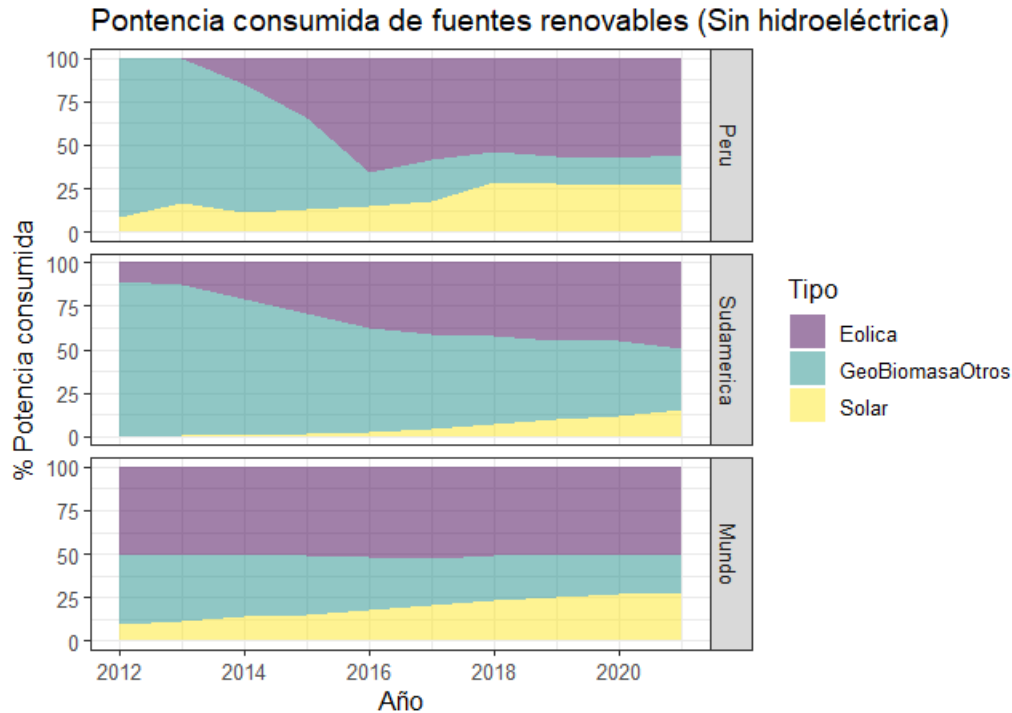


Figura 1: Comparación del porcentaje de la cantidad de potencia consumida por tipo de energía renovable sin considerar la hidroeléctrica. Fuente: Our World in Data [6]

usadas para fines domésticos o industriales, y porque reducirían notablemente las emisiones de CO_2/kWh , por ejemplo esta reducción sería cercana al 90 % para sistemas que sustituyan al gas natural [10].

Las celdas solares llevan en el mercado más de 60 años, desde su descubrimiento en los Laboratorios Bell en 1954 [11] y su primer uso comercial en el satélite Vanguard [12] en 1958, estos se han diversificado en su composición, por ende, también en su eficiencia y estabilidad. Según la clasificación del *National Renewable Energy Laboratories* (NREL) los tipos de celdas se pueden agrupar en cinco familias: Cristalinas de silicio, de unión simple de galio (Ga) y arsénico (As), de unión múltiple, basadas en películas delgadas y emergentes [13]. Los puntos en común de estas familias son la similitud de sus componentes, arquitecturas y/o coetaneidad [14]. Cabe mencionar que en adelante solo se tomarán en cuenta tecnologías fotovoltaicas que no tengan concentradores.

En primer lugar se encuentra la familia de las celdas basadas en cristales de silicio que congrega a las celdas de monocristal [15], multicristal [16], con heteroestructuras de silicio [17] y con películas delgadas de silicio cristalino [18]. Segundo, las celdas de unión simple (Ga-As) en donde están las que se basan en cristales y las de películas delgadas [19]. Tercero, las celdas de unión múltiple que tienen celdas con arquitecturas con dos, tres y cuatro a más uniones [20, 21]. Cuarto, en las celdas basadas en películas delgadas están las celdas de cobre-indio-galio-selenio (CIGS) [22], cadmio-teluro (CdTe) [23] y silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) [24]. Y en quinto lugar, las celdas emergentes, que se caracteriza por agrupar las tecnologías que

llevan menos tiempo siendo investigadas tales como las celdas sensibilizadas por tintes (CSPT) [25], las inorgánicas basadas en kesterita $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ (CZTSSe) [26], las celdas orgánicas [27], orgánicas tipo *sándwich* [28], las celdas perovskitas [29], perovskitas-CIGS monolítica tipo *sándwich* [30], perovskitas-SI monolítica tipo *sándwich* [30] y celdas con *quantum-dots* [31].

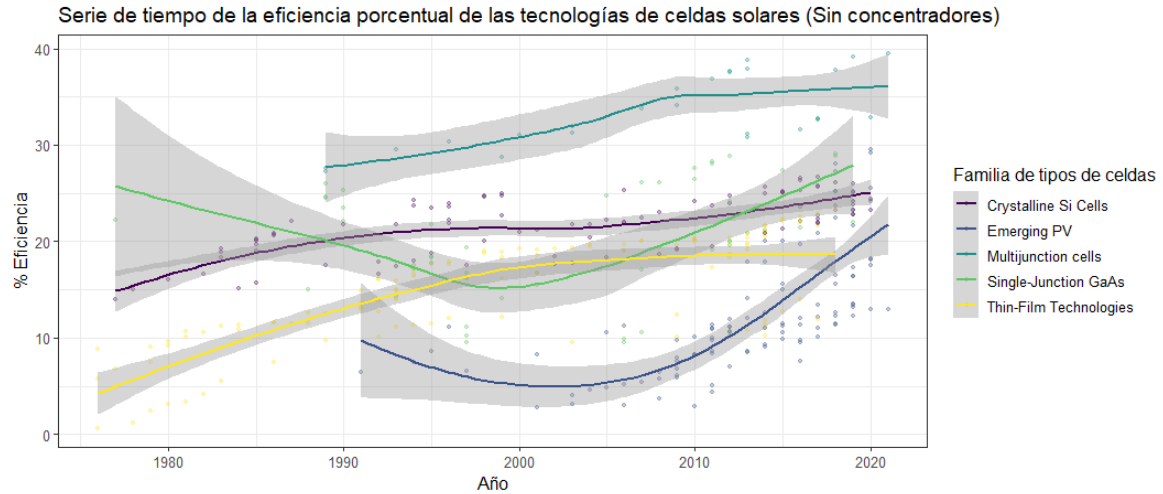


Figura 2: Serie de tiempo de las mejores eficiencias obtenidas en la investigación de las celdas solares según la agrupación dada por NREL. Fuente: *National Renewable Energy Laboratory* [13]

Para contrastar dichas tecnologías se pueden usar las mejores eficiencias de conversión energética de estos dispositivos obtenidos en el laboratorio que fueron recopilados por la NREL entre los años de 1980 y 2021 (Figura 2). En esa gráfica se observa que las tecnologías con mayor rendimiento han sido las celdas de unión múltiple, esto se debe a que sus arquitecturas fueron diseñadas para que haya un efecto sinérgico gracias a la apilación de los mejores materiales fotoeléctricos y de transporte de carga que existían en su época, no obstante, estos serían más costosos que los demás por la mayor cantidad y diversidad de materiales que se demandan para fabricarlos. También se aprecia que las tendencias de investigación de las celdas de silicio cristalino y las películas delgadas han desacelerado el aumento de sus rendimientos a diferencia de las celdas de unión simple Ga-As o emergentes. Es probable que esto sea consecuencia del descubrimiento de nuevos materiales con menores costos de producción, ambiental y con buen desempeño, por ejemplo: Moléculas orgánicas aceptoras-donadoras o *quantum dots*.

Es un hecho que las tecnologías emergentes están igualando, en términos de performance en el laboratorio, a las celdas comercialmente más comunes como lo son las de silicio multicristalino y las películas de Ga-As [32]. Es por ello que es importante seguir investigándolas, pero como se mencionó anteriormente, esta familia reúne diversas tecnologías y por tal motivo es importante sopesarlas desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Con los datos del NREL se construyó una serie de tiempo de las mejores eficiencias que muestran en el laboratorio todos los tipos de celdas que pertenecen a las tecnologías emergentes (Figura 3). En dicha gráfica se da cuenta que las celdas basadas en perovskitas encabezan a las demás y a su vez son las más recientes en ser exploradas, este material está compuesto por átomos de titanio y calcio dispuestos ortorrómbicamente cuando es cristalino, tiene un *bandgap* de 1.5 eV, un alta constante dieléctrica, capacidad de separar rápidamente la carga y de ser funcionalizados con CIGS, Si, Sn y/o Pb para extender el rango de absorción del espectro solar (300-800 nm) y

aumentar el coeficiente de absorción (10^5 cm^{-1}) [33]. A pesar de que estas ventajas han hecho de las celdas de perovskitas las más prometedoras de las emergentes, la exposición al ambiente de estos dispositivos sería tóxico para la salud de los seres vivos, debido al Sn o Pb [34]. Otras celdas que presentan el mismo problema son las que tienen *quantum dots* [35] o compuestos inorgánicos CZTSSe [26], ya contienen Cd y Sn respectivamente, aparte que hay esfuerzos por mejorar su estabilidad y disminuir sus costos de fabricación, los cuales dificultan su comercialización.

Contrario a las ya mencionadas tecnologías emergentes, las celdas orgánicas y las celdas sensibilizadas por tintes (CSPT) son más sostenibles gracias a la capacidad de degradación de los polímeros que los componen, además tienen otras ventajas como lo son su construcción por módulos o etapas, las diversas estructuras químicas de sus componentes orgánicos o metal-orgánicas y, en consecuencia, costos de fabricación accesibles de ser escalados para fines comerciales. Si bien las CSPT han sido las primeras en ser investigadas, las celdas orgánicas las han superado en términos de eficiencia debido al descubrimiento de materiales compuestos por moléculas aceptoras y donadoras de alto rendimiento para generar y transportar carga [36]. Estos descubrimientos fueron guiados por conocimiento específico de las relaciones que hay entre la estructura y las propiedades de las moléculas, en la etapa de diseño y posteriormente evaluadas experimentalmente. No obstante, aún hay brechas en el conocimiento de la existencia de tintes que sean capaces de equiparar a sus similares orgánicas. Complementando la anterior idea, existe la probabilidad de encontrar tintes con propiedades de interés fotovoltaico extraídos de la biodiversidad peruana, lugar donde se realizará el presente proyecto.

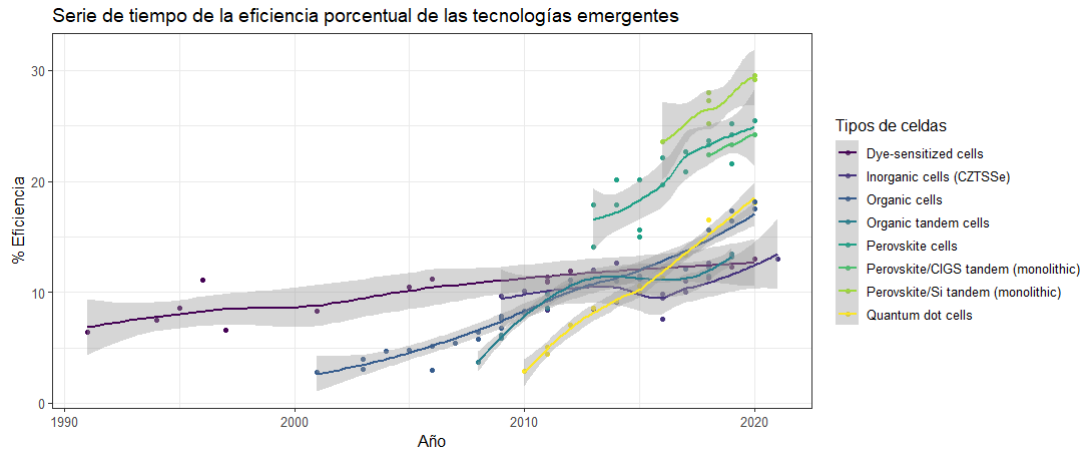


Figura 3: Serie de tiempo de las mejores eficiencias obtenidas en la investigación de las tecnologías emergentes de celdas solares. Fuente: *National Renewable Energy Laboratory* [13]

Entiéndase por tintes o colorantes a las sustancias que estén constituidas por una mezcla de varias moléculas dentro de una fase líquida o sólida que muestran una coloración dentro de un rango de longitudes de onda. Mientras que las CSPT son dispositivos que aprovechan sus propiedades fotoactivas dentro de uno de sus componentes. Las arquitecturas de las CSPT se componen por 4 materiales: El semiconductor, el tinte o sensibilizador, el electrolito y los vidrios conductores (Figura 4). Las CSPT modernas derivan de la celda creada por Brian O’Rigan y Michael Gratzel en 1991 [37], la cual comúnmente se usa para exponer el funcionamiento de estos dispositivos. En dicha celda, se usó óxido de estaño dopado con flúor y partículas de platino (Pt-FTO) como vidrio conductor, el cuál soportaba el óxido de titanio TiO_2 nanocrystalino dopado a

su vez por nanopartículas de complejos triméricos de rutenio(II) bipiridina (Rutenio-bipiridina) como semiconductor y tinte sensibilizante, respectivamente. Para la regeneración del tinte se utilizó yoduro/triyoduro como electrolito redox. El fotovoltage (ΔV) de celda corresponde al potencial teórico de trabajo útil y puede aproximarse a la diferencia entre el nivel de energía de Fermi del semiconductor bajo iluminación y el potencial de Nernst del par redox del electrolito.

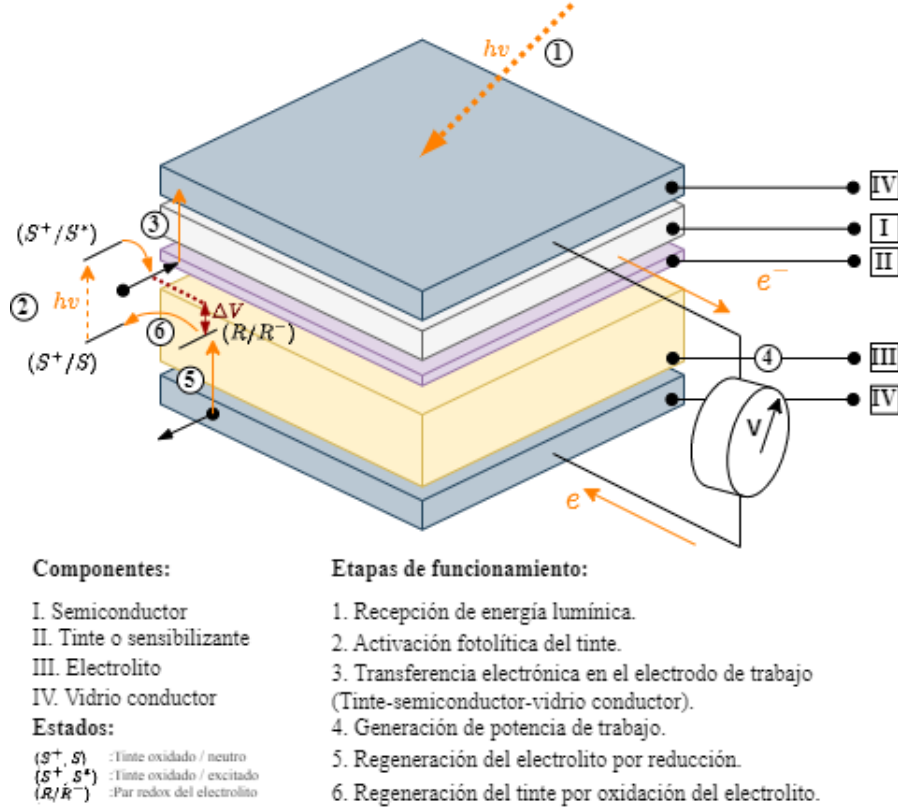


Figura 4: Estructura y funcionamiento de una celda solar sensibilizada por tinte (CSPT). Fuente: O'Rigan y Grätzel [37]

Cada uno de los componentes influyen directamente al rendimiento de la celda en términos de dos ecuaciones: La eficiencia de corriente monocromática ($\eta_i(\lambda)$) y la eficiencia del potencial de conversión (PCE). La ecuación 1 describe la capacidad del dispositivo para mantener el flujo eléctrico de celda generado por fenómenos fotoeléctricos. Esta capacidad se calcula como el producto de la eficiencia de recolección de luz de longitud λ (LHE(λ)) que mide la fracción de fotones incidentes que son absorbidos por el tinte, el rendimiento cuántico de inyección de carga (ϕ_{inj}) que mide el número de huecos inyectados hacia la capa de valencia o electrones a la banda de conducción del semiconductor sensibilizado por número de einstein absorbidos, y la eficiencia de colección de carga de retorno (η_e) que mide la fracción de electrones que llegan al contraelectrodo después de la emisión de

$$\eta_i(\lambda) = \text{LHE}(\lambda) \times \phi_{inj} \times \eta_e \quad (1)$$

La ecuación 2 describe la capacidad del dispositivo para mantener el flujo eléctrico de celda generado por fenómenos fotoeléctricos. Esta capacidad se calcula como el producto de la eficiencia de recolección de luz de longitud λ ($text{LHE}(\lambda)$) que mide la fracción de fotones incidentes que son absorbidos por el tinte,

$$\text{PCE} = \frac{J_{sc} \times V_{OC} \times FF}{P_{in}} \quad (2)$$

Es claro que deben de validarse experimentalmente los resultados obtenidos por los métodos computacionales, pero estos pueden discriminar cientos de candidat

pero dado un grado de precisión razonable en la predicción de la propiedad del material, estos modelos computacionales aceleran el proceso de elegir mejores estructuras o moléculas candidatas con la correcta combinación de propiedades necesarias para cumplir satisfactoriamente con el propósito para las que fueron hechas *Leon R. Devereux*.

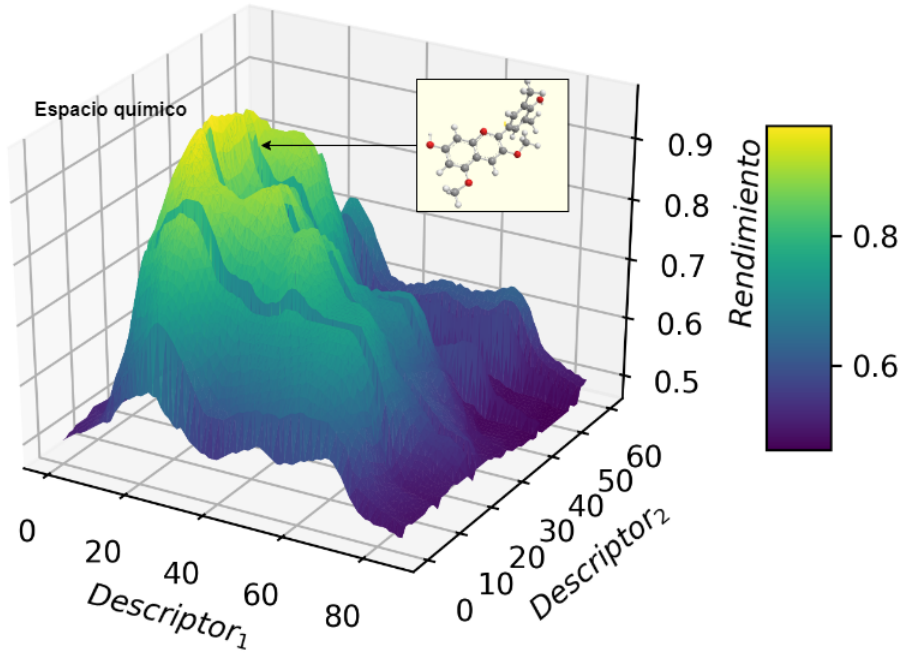


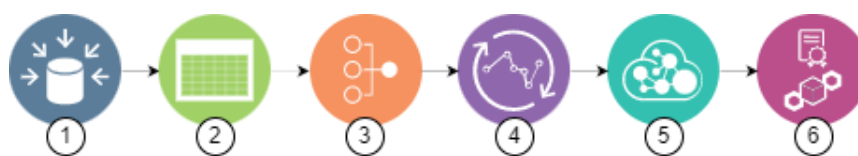
Figura 5: Serie de tiempo de las mejores eficiencias obtenidas en la investigación de las celdas solares según la agrupación dada por NREL. Fuente: *National Renewable Energy Laboratory* [6]

1.2. Justificación

La referencia es citada en [38]

Los procesos en el descubrimiento de celdas solares con mayor eficiencia de producción energética y sostenibilidad tales como el diseño, la prospección, la construcción son lentos, costosos y poco eficientes. Y el tiempo que toma que estas nuevas celdas solares tengan rentabilidad comercial para las partes que financiaron la investigación es reducido [39].

La ciencia de materiales dirigida por datos



Etapas:

1. Recopilación de datos en fuentes bibliográficas o simulaciones computacionales.
2. Limpieza, tratamiento e ingeniería de datos
3. Análisis estadístico de las variables características y objetivo.
4. Entrenamiento y evaluación de los modelos de aprendizaje automático.
5. Análisis de interpretabilidad química q de los modelos de aprendizaje automático.
6. Extracción del modelo de aprendizaje automático interpretativo con mejor desempeño.

Figura 6: Serie de tiempo de las mejores eficiencias obtenidas en la investigación de las celdas solares según la agrupación dada por NREL. Fuente: *National Renewable Energy Laboratory* [6]

1.3. Antecedentes

En los antecedentes se

2. Hipótesis de investigación y objetivos

2.1. Hipótesis de investigación

2.2. Objetivos

3. Marco Teórico

3.1. Celdas solares sensibilizadas por tintes (CSPT)

3.1.1. Componentes de las CSPT

3.1.2. Funcionamiento de las CSPT

3.1.3. Tipos de sensibilizantes

3.2. Colorantes naturales

3.2.1. Características físicas y químicas

3.2.2. Familias de colorantes naturales usados como sensibilizantes

3.3. Enfoque de investigación direccionado por datos

3.3.1. Tipos de enfoques de investigación en química

3.3.2. Tipos de estructuras de datos en química

3.3.3. Extracción y preprocesamiento de datos

3.3.4. Tratamiento de datos

3.3.5. Descubrimiento y análisis de características

3.3.6. Entrenamiento y evaluación de modelos

3.3.7. Validadores estadísticos de los modelos

3.4. Modelos de aprendizaje automático

3.4.1. Naturaleza de los modelos de aprendizaje automático

3.4.2. Interpretatividad de los modelos de aprendizaje automático

3.4.3. Clasificadores clásicos

3.4.4. Clasificadores ensamblados

3.4.5. Evaluadores de los resultados de clasificación

4. Materiales y métodos

4.0.1. Extracción de datos

4.0.2. Preprocesamiento de datos

4.0.3. Descubrimiento y análisis de características

4.0.4. Entrenamiento y evaluación del modelo 1

4.0.5. Entrenamiento y evaluación del modelo 2

4.0.6. Entrenamiento y evaluación del modelo 3

4.0.7. Comparación de modelos

4.1. Análisis estadístico

4.1.1. Pruebas de normalidad

La verificación de la normalidad de la distribución de un conjunto de datos se puede obtener a través de técnicas gráficas y por pruebas.

En primer lugar, aquellas basadas en gráficas tienen como

Data

La cien Actualmente, cerca del 50 % de las nuevas publicaciones de artículos son de acceso abierto y estimaciones hechas por (Ref 33 Y 34) indican que estás casi en su totalidad lo serán también para el 2040.

Herramientas de libre acceso

El software de acceso abierto es el conjunto de herramientas computacionales que permiten las operaciones de la ciencia de datos basada en datos. Este tipo de software adquiere importancia desde la aparición pública del internet y el sistema operativo LINUX en 1990, cuyos desarrollos fueron netamente colaborativos. Adicionalmente, el nacimiento de herramientas de control de versiones y lenguajes de programación de alto nivel permitieron el nacimiento de repositorios proyectos científicos (46), notebooks electrónicos (47), paquetes de simulación y experimentos(49) y librerías de aprendizaje automático y ciencia de datos (50).

5. Referencias bibliográficas

Referencias

1. Mayer A. Fossil fuel dependence and energy insecurity. *Energy, Sustainability and Society* 2022; 12:1-13
2. Vernon R. Oil Crisis. 1976
3. Rodriguez-Fernandez L, Carvajal ABF y Tejada VF de. Improving the concept of energy security in an energy transition environment: Application to the gas sector in the European Union. *The Extractive Industries and Society* 2022; 9:101045
4. Guilyardi E, Lescarmontier L, Matthews R, Point SP, Rumjaun AB, Schlüpmann J y Wilgenbus D. IPCC Special Report “Global Warming of 1.5° C”: Summary for Teachers. 2018
5. Asmelash E, Prakash G, Gorini R y Gielen D. Role of IRENA for global transition to 100 % renewable energy. *Accelerating the transition to a 100 % renewable energy era*. Springer, 2020 :51-71
6. Ritchie H, Roser M y Rosado P. Energy. Our World in Data 2020. <https://ourworldindata.org/energy>
7. IRENA. Renewable Energy Statistics 2022. Renewable Energy Target Setting, Abu Dhabi, UAE 2022
8. Hammarström L. Overview: capturing the sun for energy production. *Ambio* 2012; 41:103-7
9. Xu Y, Pei J, Yuan J y Zhao G. Concentrated solar power: technology, economy analysis, and policy implications in China. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29:1324-37
10. Tawalbeh M, Al-Othman A, Kafiah F, Abdelsalam E, Almomani F y Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment* 2021; 759:143528
11. Green MA. The path to 25 % silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in photovoltaics: research and applications* 2009; 17:183-9
12. Singh GK. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy* 2013; 53:1-13

13. NREL. National Renewable Energy Laboratory Best Research-Cell Efficiency Chart. Available from: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [Accessed on: 2022 Sep 26]
14. Blakers A, Zin N, McIntosh KR y Fong K. High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia* 2013; 33:1-10
15. Gul M, Kotak Y y Muneer T. Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration & Exploitation* 2016; 34:485-526
16. Möller HJ, Funke C, Rinio M y Scholz S. Multicrystalline silicon for solar cells. *Thin Solid Films* 2005; 487:179-87
17. Sark Wv, Korte L y Roca F. Introduction–Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells. *Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells*. Springer, 2012 :1-12
18. Brendel R. Thin-film crystalline silicon solar cells: physics and technology. John Wiley & Sons, 2011
19. Konagai M, Sugimoto M y Takahashi K. High efficiency GaAs thin film solar cells by peeled film technology. *Journal of crystal growth* 1978; 45:277-80
20. Dimroth F y Kurtz S. High-efficiency multijunction solar cells. *MRS bulletin* 2007; 32:230-5
21. Philipps SP, Dimroth F y Bett AW. High-efficiency III–V multijunction solar cells. *McEvoy's handbook of photovoltaics*. Elsevier, 2018 :439-72
22. Wada T, Hashimoto Y, Nishiwaki S, Satoh T, Hayashi S, Negami T y Miyake H. High-efficiency CIGS solar cells with modified CIGS surface. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2001; 67:305-10
23. Ferekides C, Balasubramanian U, Mamazza R, Viswanathan V, Zhao H y Morel D. CdTe thin film solar cells: device and technology issues. *Solar energy* 2004; 77:823-30
24. Krč J, Smole F y Topić M. Analysis of light scattering in amorphous Si: H solar cells by a one-dimensional semi-coherent optical model. *Progress in photovoltaics: Research and Applications* 2003; 11:15-26
25. Sharma K, Sharma V y Sharma S. Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status. *Nanoscale research letters* 2018; 13:1-46
26. Suryawanshi M, Agawane G, Bhosale S, Shin SW, Patil P, Kim JH y Moholkar A. CZTS based thin film solar cells: a status review. *Materials Technology* 2013; 28:98-109
27. Hoppe H y Sariciftci NS. Organic solar cells: An overview. *Journal of materials research* 2004; 19:1924-45
28. Ameri T, Dennler G, Lungenschmied C y Brabec CJ. Organic tandem solar cells: A review. *Energy & Environmental Science* 2009; 2:347-63
29. Jung HS y Park NG. Perovskite solar cells: from materials to devices. *small* 2015; 11:10-25
30. Li H y Zhang W. Perovskite tandem solar cells: from fundamentals to commercial deployment. *Chemical Reviews* 2020; 120:9835-950
31. Kim M, Jeong J, Lu H, Lee TK, Eickemeyer FT, Liu Y, Choi IW, Choi SJ, Jo Y, Kim HB y col. Conformal quantum dot–SnO₂ layers as electron transporters for efficient perovskite solar cells. *Science* 2022; 375:302-6
32. Chowdhury MS, Rahman KS, Chowdhury T, Nuthammachot N, Techato K, Akhtaruzzaman M, Tiong SK, Sopian K y Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews* 2020; 27:100431

33. Velilla E, Ramirez D, Uribe JI, Montoya JF y Jaramillo F. Outdoor performance of perovskite solar technology: Silicon comparison and competitive advantages at different irradiances. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2019; 191:15-20
34. Wang X, Dong B, Feng M, Xue DJ y Wang SM. Sustainable management of lead in perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* 2022; 10:15861-4
35. Pan Z, Mora-Seró I, Shen Q, Zhang H, Li Y, Zhao K, Wang J, Zhong X y Bisquert J. High-efficiency “green” quantum dot solar cells. *Journal of the American Chemical Society* 2014; 136:9203-10
36. Li Y, Huang W, Zhao D, Wang L, Jiao Z, Huang Q, Wang P, Sun M y Yuan G. Recent Progress in Organic Solar Cells: A Review on Materials from Acceptor to Donor. *Molecules* 2022; 27:1800
37. O’regan B y Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *nature* 1991; 353:737-40
38. Wen Y, Fu L, Li G, Ma J y Ma H. Accelerated Discovery of Potential Organic Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells by Interpretable Machine Learning Models and Virtual Screening. *Solar RRL* 2020; 4:2000110
39. Eagar TW. Bringing new materials to Market. en. *ABI/INFORM Global* 1995; 98:42

6. Cronograma de trabajo

7. Presupuesto y financiamiento