

Facultad de Matemática y Computación

Universidad de La Habana



**Tesis de diploma de la carrera Ciencia de la
Computación**

**Recuperación semántica de música utilizando
embeddings y modelos de clasificación.**

Autor: Niley González Ferrales

Tutor: Dr. Yudivian Almeida

La Habana

2023

A la ciencia.

Opinión del tutor

Dr. Yudivian Almeida
Facultad de Matemática y Computación
Universidad de la Habana
Enero, 2023

Resumen

Palabras claves:

Abstract

Keywords:

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto histórico/social	1
1.2. Motivación	2
1.3. Antecedentes	4
1.4. Problemática	4
1.5. Objetivos	4
1.6. Preguntas científicas	5
1.7. Estructura de la tesis	6
2. Desarrollo	7
2.1. Marco teórico	7
2.1.1. Procesamiento y recuperación de información musical	7
2.1.2. Recuperación de música basada en texto	10
2.1.3. Brecha semántica (Semantic gap)	11
2.1.4. Procesamiento de Lenguaje Natural en MIR	12
2.1.5. Descripción de música (<i>Music captioning</i>)	12
2.1.6. Aprendizaje a partir de Supervisión de Lenguaje . . .	13
2.1.7. <i>Embeddings</i> en recuperación de información	14
2.2. Modelación y diseño	16
2.3. Detalles de implementación	17
2.4. Resultados	18
Conclusiones	19
Recomendaciones	20
Bibliografía	21

Capítulo 1

Introducción

El auge de la tecnología digital, en los últimos años, ha llevado a una explosión en la cantidad de contenido multimedia accesible en línea. Incluyendo texto (libros, páginas web, ...), imágenes, videos y música; la red se ha convertido en un repositorio de información con un crecimiento vertiginoso [1]. La necesidad de buscar en bases de datos cada vez más grandes ha impulsado importantes avances en el campo de la búsqueda y recuperación de información. Existen motores de búsqueda para diversos contenidos como páginas webs, imágenes y videos; sin embargo la música no es accesible de la misma forma [2]. En este contexto, la presente tesis se propone explorar nuevas técnicas y enfoques para la búsqueda y recuperación de música en grandes bases de datos, con el objetivo de mejorar la accesibilidad de este recurso.

1.1. Contexto histórico/social

Durante las últimas décadas la tecnología computacional se ha desarrollado al punto de estar presente, de una manera u otra, en casi todos los procesos cotidianos de los seres humanos. La velocidad a la que se generan grandes volúmenes de datos (conocido comunmente como *big data*), en la actualidad, desafía las capacidades de procesamiento computacional [3]. Una característica fundamental de estos volúmenes de datos es la gran variedad que presentan, siendo alrededor del 80% de naturaleza no estructurada. Y precisamente, la recuperación de información se define como encontrar resultados de naturaleza no estructurada que satisfaga una necesidad de información dentro de una gran colección de datos [4].

Los sistemas de recuperación de información (SRI) consisten en tecnologías y métodos diseñados para la búsqueda, almacenamiento, recuperación y organización de información. Estos sistemas son esenciales en la gestión de grandes cantidades de datos en diversos entornos, como bibliotecas digitales, bases de datos en línea y motores de búsqueda en la web.

La recuperación de información utilizando computadoras se remonta a la década de 1950, y desde entonces se han desarrollado grandes ideas en el campo. Entre estas ideas se encuentran la creación de rankings de documentos, la representación vectorial de documentos y consultas, el agrupamiento de documentos similares, la asociación de términos con similitudes semánticas, la introducción de la frecuencia inversa en documentos y los modelos de semántica latente.[5]

Uno de los avances recientes en la recuperación de información es el uso de redes neuronales. Este es un campo que ha avanzado a pasos agigantados en la última década, en gran parte gracias al aumento del poder computacional introducido con las GPU. Los modelos de lenguaje, como Word2Vec [6], GloVe [7] y los más recientes, basados en transformers, como BERT [8] y GPT [9], han demostrado una capacidad excepcional para capturar el significado semántico y la relación contextual entre palabras y frases. Estos modelos, operan con representaciones de *embeddings* a partir de diferentes enfoques cada uno.

Los embeddings son representaciones, en un espacio de relativamente baja dimensionalidad, de tokens como frases, párrafos o documentos, a partir de un espacio vectorial de alta dimensionalidad, donde cada dimensión corresponde a una característica o atributo del lenguaje aprendido. Al aplicar estos *embeddings* a la representación de documentos y consultas, se ha logrado una mejora significativa en la precisión y la relevancia de los resultados de recuperación de información [10].

1.2. Motivación

A pesar de que los SRI se han centrado principalmente en la recuperación de información con forma textual, se ha reconocido la necesidad de adaptar el entorno para manejar todo tipo de datos (como imágenes, videos, audios) [11]. La recuperación de información en datos no textuales presenta desafíos únicos, como la necesidad de comprender el contenido visual o auditivo de los datos. En el caso de imágenes, por ejemplo, la búsqueda puede basarse en características visuales como el color, la textura

o la forma. En el caso de videos y audios, la búsqueda puede basarse en características como el tono, el ritmo o el contenido verbal. En los últimos años, ha habido avances significativos en la recuperación de información en datos no textuales, impulsados por el desarrollo de algoritmos de *deep learning* y el aumento de la capacidad computacional. Estos avances han permitido el desarrollo de sistemas más precisos y eficientes para la recuperación de imágenes, videos y audios.

Una herramienta utilizada comúnmente para recuperar información multimedia es representar los datos como texto, empleando metadatos [12]. Estos metadatos sirven para describir y normalizar la representación de la información digital, lo que a su vez facilita su posterior búsqueda y recuperación. A pesar de sus beneficios, el uso de metadatos fijos conlleva limitaciones significativas como la imposibilidad de adaptarse a cambios en la información y la falta de precisión en la descripción de la información, así como la restricción a una cantidad limitada de información descriptiva. En este sentido, los metadatos fijos pueden resultar insuficientes para abarcar la complejidad inherente a la información multimedia, lo que a su vez puede dificultar su precisa recuperación.

La creación de metadatos suele requerir un enfoque manual, o en su defecto, la utilización de modelos de inteligencia artificial. Sin embargo, estos modelos, al depender de los datos con los que fueron entrenados, sufren dificultades para generalizar adecuadamente para contextos específicos. Además, la naturaleza dinámica de la información multimedia puede llevar a que los metadatos fijos se vuelvan obsoletos con el tiempo, lo que impacta negativamente la precisión y exhaustividad en la recuperación de información.

Dadas las limitaciones que presenta la recuperación utilizando metadatos, se han estudiado otras alternativas. Un ejemplo es la consulta por tarareo (*query-by-humming*) o la consulta por ejemplo (*query-by-example*), en la que la consulta se representa mediante una grabación de audio y el sistema recupera la canción correcta (la más similar). La recuperación basada en contenido consiste en buscar audio que coincida con una consulta de audio. Dado un audio de ejemplo, se devuelven los audios más similares en la base de datos. Sin embargo, satisfacer los requisitos para introducir un audio puede resultar difícil para los usuarios. Por otro lado, las consultas detalladas en lenguaje natural con forma libre, constituyen una interfaz familiar ampliamente utilizada en los motores de búsqueda actuales, lo que permite solicitar música con información semántica.

Permitir a los usuarios buscar música utilizando oraciones en lenguaje natural introduce una capa adicional de complejidad, ya que requiere el puen-

te entre la semántica del lenguaje y la representación de la música en sí misma.

Uno de los desafíos clave, en la integración del lenguaje natural y análisis de audios en los SRI, se encuentra en la representación efectiva de la música en función de las consultas textuales. Hasta donde se ha podido comprobar, este problema no ha sido abordado utilizando las emergentes capacidades semánticas y contextuales de los grandes modelos de lenguajes (LLM por sus siglas en inglés). Tampoco se ha observado una estrategia de caracterización de la música empleando modelos pre-entrenados de inteligencia artificial, como una alternativa a entrenar modelos de *music captioning* que son la forma más directa de representar música como texto. Dependiendo de un único modelo trae desventajas en cuanto a que las características que se pueden extraer, están limitadas a las que aparecen en los datos de entrenamiento; esas desventajas son acentuadas por el conocido problema que hay con la indisponibilidad de *datasets* de tamaño adecuado y con amplio rango de modalidades [13].

1.3. Antecedentes

Este trabajo es pionero en la investigación de recuperación semántica de música en la Facultad. No se cuentan con investigaciones en esta área.

1.4. Problemática

Durante una exhaustiva investigación no se encontró ningún sistema o diseño, que permita organizar y recuperar música de una gran base de datos, utilizando consultas en lenguaje natural y con componentes semánticos; y que además sea escalable respecto a las características(o *features*) que se conocen de la música.

1.5. Objetivos

El objetivo de esta investigación es el diseño e implementación de un prototipo de una plataforma que permita realizar consultas en lenguaje natural sobre una base de datos de música.

Los objetivos específicos planteados para dar cumplimiento al objetivo general son:

- Estudiar los resultados más recientes relacionados con recuperación de información multimedia, en particular de música. Indagando en recuperación con consultas en lenguaje natural.
- Modelar una sistema de extracción de *features* que sea flexible, permitiendo actualizar y añadir información sobre la música.
- Modelar un SRI que devuelva canciones relevantes a consultas en lenguaje natural. Intentando incluir similitud semántica sin sacrificar mucha eficiencia.
- Implementar la plataforma modelada anteriormente.
- Evaluar el Sistema de Recuperación y comparar los resultados con modelaciones similares en la literatura.
- Realizar una página web utilizando *django framework* que permita escribir consultas y reproducir la música que sea resultado de la consulta; como interfaz para probar el prototipo implementado.

1.6. Preguntas científicas

A través del documento se abordarán las siguientes preguntas con la intención de resolver el problema planteado:

- ¿Un *framework* escalable conformado por modelos de *Music Information Retrieval*(MIR) de clasificación de música es, al menos, igual de efectivo al extraer características de música, que los modelos existentes de *auto-tagging* o *captioning*?
- ¿Se puede diseñar un sistema de recuperación que utilice las características extraídas (que son básicamente metadatos), pero sin las limitaciones que conllevan?
- ¿Un SRI utilizando *embeddings* es más efectivo en cuánto a similitud semántica que empleando vectores de bolsa de palabras?

1.7. Estructura de la tesis

A continuación se describe la estructura del documento. El capítulo **Desarrollo** se compone de 4 secciones. En la sección 2.1 se define el marco teórico del trabajo, que abarcará los modelos de recuperación de información, los acercamientos a recuperación de audios y música, modelos de lenguaje y como sobreponerse al *semantic gap*. En la sección 2.2 se presenta la modelación de la propuesta para atacar el problema planteado, mientras que en la sección 2.3 se describen los detalles de implementación incluyendo las alternativas que no se pudieron comprobar. Finalmente, en la sección 2.4 se muestran las evaluaciones del modelo de recuperación y similares para los pasos intermedios del sistema. Los próximos capítulos son: las **Conclusiones** y las **Recomendaciones**. El documento finaliza con la **Bibliografía**.

Capítulo 2

Desarrollo

2.1. Marco teórico

Este trabajo se relaciona con varios temas en la literatura: procesamiento y recuperación de información musical, recuperación de música basada en texto, brecha semántica, procesamiento de lenguaje natural en Recuperación de Información Musical (MIR, por sus siglas en inglés), descripción de música (*Music captioning*), aprendizaje a partir de supervisión de lenguaje y *embeddings* en recuperación de información.

2.1.1. Procesamiento y recuperación de información musical

El campo de investigación de MIR se ocupa de la extracción e inferencia de características significativas de la música (ya sea desde las señales de audio, representación simbólica o fuentes externas como páginas web), indexando la música usando estas características y desarrollando diferentes esquemas de búsqueda y recuperación (por ejemplo, búsqueda basada en contenido, sistemas de recomendación musical o interfaces de usuario para explorar grandes colecciones de música) [14].

La música es un artefacto humano altamente multimodal. En este caso, por modalidad nos referimos a una forma específica de digitalizar la información musical [13]. Diferentes modalidades se obtienen a través de diferentes transductores, en diferentes lugares o momentos, y/o pertenecen a diferentes medios. Ejemplos de modalidades que pueden asociarse a una sola pieza de música incluyen audio, letras, partituras simbólicas, portadas de álbumes, y así sucesivamente [13, 14].

Los enfoques computacionales en MIR típicamente emplean características y crean modelos para describir la música por una o más de las siguientes categorías de percepción musical: contenido musical, contexto musical, propiedades del usuario y contexto del usuario, como se define en [14]. Se hace referencia al contenido musical como los aspectos codificados en la señal de audio, tales como: ritmo, melodía, volumen, letras de canciones y timbre. Mientras que el contexto musical se define como factores que no pueden extraerse directamente del audio, pero que están relacionados, no obstante, con el ítem musical, el artista o el intérprete. Al centrarse en el usuario, los aspectos del contexto del usuario representan factores dinámicos y frecuentemente cambiantes, y las propiedades del usuario se refieren a características constantes o de cambio lento, como sus gustos musicales o educación musical.

Es importante señalar que existen interconexiones entre algunas características de diferentes categorías. Por ejemplo, los aspectos reflejados en el contexto musical (por ejemplo, el género musical) pueden ser modelados por el contenido musical (por ejemplo, la instrumentación).

Aplicaciones de procesamiento y recuperación de información musical

- La recuperación de música tiene la intención de ayudar a los usuarios a encontrar música en grandes colecciones según un criterio particular de similitud. En query-by humming (búsqueda por tarareo) y query-by example (búsqueda mediante ejemplo), el objetivo es recuperar música a partir de una entrada melódica o rítmica dada. Se basan en la comparación de una señal musical objetivo con una base de datos, pero los usuarios pueden querer encontrar música que cumpla con ciertos requisitos (por ejemplo, "dame canciones con un tempo de 100 bpm o en do mayor") [14]. De hecho, las personas generalmente usan etiquetas o descripciones semánticas (por ejemplo, "alegre." "rock") para referirse a la música. Los sistemas de recuperación basados en etiquetas semánticas o categorías...
- El alineamiento o sincronización de audio es un escenario similar a la recuperación de música donde, además de identificar un fragmento de audio dado, el objetivo es conectar localmente, posiciones temporales de dos señales musicales.
- Los sistemas de recomendación de música suelen proponer una lista de piezas musicales basándose en modelar las preferencias musicales del usuario.

- La generación automática de listas de reproducción está relacionada con la recomendación de música. Su objetivo es crear una lista ordenada de resultados, como pistas musicales o artistas, para proporcionar listas de reproducción significativas y agradables para el oyente. Una de las diferencias entre la recomendación de música y la generación de listas de reproducción es que la primera suele proponer nuevas canciones no conocidas por el usuario, mientras que la segunda tiene como objetivo reorganizar material ya conocido.

Tareas de procesamiento y recuperación de información musical

- Extracción de características (features) del contenido y contexto musical. Las características de audio pueden subdividirse en físicas y perceptuales [15]. Las físicas, que pueden calcularse en diversos dominios como el tiempo, la frecuencia o la wavelet, incluyen zero-crossing rate, la amplitud, el ritmo, basadas en autoregresión, basadas en STFT (Transformada de Fourier de Tiempo Corto), brillo, tonalidad, croma y forma del espectro. Por otro lado, las características perceptuales intentan integrar el procesamiento de percepción del sonido humano. Por ejemplo, los Coeficientes Cepstrales de Frecuencia Mel (MFCC), paquetes de wavelets perceptuales, y la intensidad sonora.
- La similitud es la tarea de calcular la semejanza entre el contenido de la información. A menudo, esta tarea tiene el propósito de recuperar documentos de una colección a través de una consulta, que puede ser explícitamente expresada por el usuario o deducida implícitamente por el sistema [13]. Un ejemplo muy común de consultas de similitud explícita es la búsqueda por ejemplo, en la cual la consulta está representada por una grabación de audio y el sistema recupera la canción correcta. Por otro lado, las consultas implícitas se utilizan en sistemas de recomendación y generadores de listas de reproducción.
- La clasificación consiste en tomar como entrada una pieza musical y devolver una o más etiquetas. Una tarea de clasificación popular es el reconocimiento del estado de ánimo o la emoción [16], mientras que una emergente es la clasificación de género [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Ambas tareas pueden aprovechar grabaciones de audio, letras, portadas y metadatos. Otras tareas de clasificación incluyen: clasificación de instrumentos, clasificación de obras derivadas, identificación de tonos y descripción musical expresiva.

2.1.2. Recuperación de música basada en texto

Con el paso de los años, se han propuesto numerosos enfoques para navegar, buscar y descubrir música a través de una variedad de interfaces [24]. Más allá de la búsqueda simple por metadatos, los sistemas de recuperación de música permiten expresar consultas a través de letras [25], ejemplos de audio [26], videos [27] y tarareos [28], entre otros.

A pesar de que cada uno de estos tipos de consulta tiene sus méritos, ninguno de ellos admite una de las formas más populares de buscar música en la actualidad: mediante texto libre. Por ejemplo, comúnmente buscamos canciones escribiendo texto en un motor de búsqueda o preguntando a comunidades en línea para identificar una pieza de música de la que no tenemos información bibliográfica o editorial. Habilitar a los sistemas MIR para interpretar consultas en lenguaje natural puede tener beneficios de gran alcance [24].

Un sistema de recuperación basado en texto ideal necesita ser flexible para permitir varios tipos de entrada (como palabras, oraciones) y tener vocabularios abundantes. Por ejemplo, se pueden utilizar etiquetas populares como el género, para explorar la biblioteca musical. A veces, las consultas de entrada pueden incluir tipos de etiquetas musicales no vistas anteriormente. Además, uno puede utilizar descripciones más detalladas a nivel de oración para descubrir música.

La recuperación basada en texto es desafiante porque necesita manejar, no solo metadatos editoriales (título, artista, año de lanzamiento), sino también información semántica (género, estado de ánimo, tema). Además, los sistemas modernos de recuperación, como los asistentes de voz, necesitan generalizar a entradas de lenguaje natural a nivel de oración; más allá de vocabularios con etiquetas fijas [12].

Otro enfoque reciente para la recuperación de información (IR) es a través de modelos neuronales de ranking, que utilizan redes neuronales superficiales o profundas. Los modelos tradicionales de aprendizaje de clasificación emplean técnicas de aprendizaje automático sobre *features* hechos a mano. En contraste, los modelos neuronales aprenden representaciones del lenguaje a partir de texto puro; que pueden disminuir la brecha entre el vocabulario de la consulta y el del documento [29].

Desde el comienzo de la década, ha habido mejoras dramáticas en el rendimiento en tareas de visión por computadora, reconocimiento de voz y traducción automática, tanto en la investigación como en aplicaciones del mundo real [30]. Estos avances han sido propulsados en gran medida por los recientes progresos en modelos de redes neuronales, generalmente

con múltiples capas ocultas, conocidos como arquitecturas profundas (*deep learning*) [30, 31, 32, 33].

Los modelos neuronales para IR utilizan representaciones vectoriales de texto y suelen contener una gran cantidad de parámetros que necesitan ser ajustados. Los modelos de aprendizaje automático (*machine learning*, ML) con un gran conjunto de parámetros suelen requerir una gran cantidad de datos de entrenamiento [34].

El aprendizaje de representaciones adecuadas de texto, también requiere *datasets* a gran escala durante el entrenamiento [35]. Por lo tanto, a diferencia de los modelos clásicos de IR, estos enfoques neuronales tienden a requerir muchos datos; mejorando su rendimiento con la cantidad de datos de entrenamiento [29].

Los enfoques más similares a nuestra investigación son los estudios en [24, 36], que utilizan aprendizaje contrastivo cruzado y multimodal para crear un espacio compartido de *embeddings* o *embeddings* multimodales. En noviembre de 2022, [12] ahonda en un estudio de diseños efectivos para sistemas de recuperación de texto-música, proponiendo un sistema universal de recuperación de texto-música, que logra un rendimiento de recuperación comparable tanto en consultas a nivel de *tags* como a nivel de oraciones.

2.1.3. Brecha semántica (Semantic gap)

La brecha semántica en la recuperación de música se refiere a la diferencia entre descripciones acústicas de bajo nivel y conceptos humanos de alto nivel (significativos para la percepción musical humana). Por ejemplo, el mismo tempo puede aparecer en diferentes géneros musicales, y un género musical dado puede estar caracterizado por diferentes tempos [37].

Esta brecha existe porque las características que los ordenadores pueden analizar, como el tono, el tempo y el volumen, no son los mismos que los conceptos que los humanos utilizan para relacionarse con colecciones de música [38]. Idealmente, los enfoques de recuperación y recomendación de música deberían incorporar aspectos de varias categorías para superar la brecha semántica [14].

Un enfoque multimodal para superar la brecha semántica en la música implica combinar diversas técnicas y fuentes de datos para mejorar la precisión de los sistemas de recuperación y recomendación de música [39].

2.1.4. Procesamiento de Lenguaje Natural en MIR

El Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP, por sus siglas en inglés) es un campo de la Ciencia de la Computación y la Inteligencia Artificial, que se ocupa de la interacción entre las computadoras y el lenguaje humano (natural) [40]. El NLP es un componente fundamental en tecnologías de la vida diaria: búsqueda en la web, reconocimiento y síntesis de voz, resúmenes automáticos en la web, recomendación de productos (incluida la música), traducción automática, entre otros.

Trabajos previos en la literatura de MIR han explorado aprovechar NLP en el ámbito musical desde diferentes enfoques. Los esfuerzos iniciales se centraron en el texto como una modalidad aislada, adoptando técnicas para construir bases de conocimiento a partir de corpus de texto relacionados con la música [41], o construir grafos semánticos para la similitud entre artistas a partir de biografías [42]. Los esfuerzos recientes han comenzado a favorecer, en cambio, enfoques multimodales. Estos han explorado el aprendizaje profundo con datos de entrada multimodales, típicamente audio combinado con texto, como reseñas o letras, para aplicaciones tan variadas como la clasificación y recomendación musical [43], detección de estado de ánimo [44], reconocimiento de emociones en la música [45] y descripción de música (captioning) [46, 47].

Por otro lado, la idea de permitir que los sistemas de MIR interpreten consultas en lenguaje natural no es nueva; algunos trabajos como [48] han sugerido direcciones de investigación similares. Sin embargo, hasta recientemente, los sistemas multimodales que integran lenguaje natural no han sido ampliamente adoptados dentro de la comunidad de MIR, posiblemente debido a la falta de *datasets* adecuados o a las limitaciones prácticas de los métodos de NLP anteriores a los modelos de lenguaje modernos [24]. A la luz de los avances recientes en modelos de lenguaje, se argumenta que el aprendizaje audio-lenguaje tiene el potencial de cerrar la brecha semántica en MIR.

2.1.5. Descripción de música (*Music captioning*)

Music captioning se define como la tarea de generar una descripción en lenguaje natural del contenido de audio de la música de una manera humana. MusCaps [46] en 2021, afirman presentar el primer modelo de *music audio captioning*. Hasta hace poco, los enfoques en MIR para la descripción de música normalmente se basaban en clasificación de una o múltiples etiquetas (*label*). Un ejemplo destacado es el *auto-tagging* de música [49, 50, 51], en

el cual se asignan *tags* descriptivos a un fragmento musical para transmitir características de alto nivel de la entrada, como género, instrumentación y emoción.

Los sistemas de *captioning* necesitan reconocer características a nivel de señal como la instrumentación y descriptores de alto nivel como el género. También producen oraciones descriptivas completamente formadas que se asemejan más a las consultas humanas. A través del uso conjunto y procesamiento de información auditiva y lingüística, *music captioning* representa un primer paso hacia el desarrollo de modelos de audio y lenguaje para la comprensión musical. Finalmente, la descripción de música tiene varias aplicaciones directas, como habilitar la búsqueda de música a través de consultas más naturalmente humanas, o proporcionar explicaciones para recomendaciones automáticas de música [46].

El estudio *Audio Retrieval with Natural Language Queries: A Benchmark Study* [2] se centra en la recuperación de eventos de audio (no musicales) mediante consultas en lenguaje natural. Considerando que aprender (en el sentido de *machine learning*) a recuperar audio con consultas en lenguaje natural requiere datos con texto y sonido emparejados, [2] afirma que los *datasets* de *audio captioning* se prestan naturalmente a esta tarea, ya que contienen audio y una descripción de texto correspondiente al sonido. Proponen aprender *cross-modal embeddings* utilizando *datasets* de *audio captioning* para el sistema de recuperación. Varios estudios en recuperación de música con consultas en lenguaje natural mencionan esta idea con *datasets* de *music captioning* [12, 24, 36]. Sin embargo, también se señala que los *datasets* existentes actualmente no abarcan la diversidad del lenguaje descriptivo del sonido [36]; mientras que [12] termina utilizando una concatenación de *tags* de diferentes fuentes de anotación como *captions*.

2.1.6. Aprendizaje a partir de Supervisión de Lenguaje

El aprendizaje multimodal todavía ocupa un papel marginal en MIR y aún no ha disfrutado completamente de los beneficios de los modelos de lenguaje modernos [24]. La idea clave detrás de estos modelos es que el lenguaje captura muchas de las abstracciones que los humanos utilizan para navegar por el mundo y, por lo tanto, puede actuar como supervisión para el aprendizaje de propósito general, incluso en tareas que no se basan directamente en el lenguaje.

Los clasificadores generalmente se entrenan para etiquetar ejemplos, con clases predefinidas y fijas. Impulsados por los avances recientes en modelación neuronal de lenguaje y su competencia demostrada en aprendizaje

por transferencia, los investigadores han comenzado a explorar menos restrictivas interfaces de lenguaje natural, para acceder a la información categórica subyacente a las señales sin procesar [36]. La mayoría de este trabajo se ha centrado en el dominio de eventos visuales y de audio, combinando contenido multimedia con subtítulos en lenguaje natural [2, 52, 53, 54].

El éxito de estos esfuerzos depende en gran medida de recursos de entrenamiento a gran escala y de arquitecturas de redes neuronales robustas, que sean lo suficientemente flexibles para modelar la compleja y no monótona relación entre el lenguaje y otras modalidades. En particular, el dominio visual ha obtenido grandes beneficios de la disponibilidad de grandes cantidades de imágenes con descripciones disponibles en la web [52]. Sin embargo, en el dominio general de audio ambiental, pares de audio-descripción a gran escala están menos disponibles y los esfuerzos relacionados se han basado en pequeños *datasets* de *captions* [55, 56].

2.1.7. *Embeddings* en recuperación de información

Un *embedding* es una representación de elementos en un nuevo espacio, de manera que se preservan las propiedades y relaciones entre los elementos. El objetivo de un *embedding* es generar una representación más simple, donde la simplificación puede implicar una reducción en el número de dimensiones, un aumento en la dispersión de la representación, desentrañar los componentes principales del espacio vectorial, o una combinación de estos objetivos [29].

Los *embeddings* de palabras, de modelos pre-entrenados, se utilizan en diversas aplicaciones, como en la construcción de representaciones para frases, párrafos y documentos [57]. Con modelos de *embedding* de palabras, los documentos preprocesados se mapean a vectores de números reales mediante tecnologías como redes neuronales, reducción de dimensionalidad en la matriz de co-ocurrencia de palabras, entre otras [58].

Dado que tienen en cuenta el contexto donde aparecen las palabras, permite la predicción de palabras faltantes en un documento. En contraste, los motores de búsqueda tradicionales, basados en palabras clave, no pueden resolver el problema de la alta discrepancia entre términos; y considerar las diferencias de significado entre palabras semánticamente similares en el proceso de comparación.

Los modelos de *embeddings* más utilizados/estudiados en la literatura incluyen:

- **Word2vec** [6] (2013): es un conjunto de modelos relacionados que se

utilizan para producir *embeddings* de palabras. Estos modelos son redes neuronales superficiales de dos capas que se entrenan para reconstruir contextos lingüísticos de palabras. Word2vec puede utilizar dos arquitecturas de modelo para producir estas representaciones distribuidas de palabras: *Continuous Bag-Of-Words* (CBOW) o *skip-gram* de deslizamiento continuo. En ambas arquitecturas, word2vec considera tanto palabras individuales como una ventana de contexto deslizante a medida que itera sobre el corpus. El problema de la dispersión en word2vec causa que la dimensión de su espacio vectorial sea mayor que otras tecnologías, lo que provoca un uso excesivo de recursos de memoria y una baja robustez [58].

- **GloVe** [7] (2014): acuñado a partir de su nombre en inglés *Global Vectors*, es un algoritmo de aprendizaje no supervisado para obtener representaciones vectoriales de palabras. Resulta en un modelo global de regresión log-bilineal que combina las ventajas de las dos principales familias de modelos en la literatura: factorización de matrices globales y métodos locales de ventana de contexto.
- **BERT** [8] (2019): abreviatura de *Bidirectional Encoder Representations from Transformers*, es un modelo de lenguaje basado en la arquitectura *transformer*, notable por su mejora dramática respecto a anteriores modelos en el estado del arte. El modelo pre-entrenado de BERT puede ser ajustado (*fine-tuning*) con solo una capa de salida adicional, para crear modelos de última generación para una amplia gama de tareas; como respuesta a preguntas e inferencia de lenguaje, sin modificaciones sustanciales en la arquitectura específica de la tarea. *Sentence BERT* (SBERT) [59] es un algoritmo basado en aprendizaje automático que utiliza un *transformer* de oraciones para generar *embeddings* de oraciones mediante una red neuronal siamesa. SBERT puede ser beneficioso para la búsqueda semántica y la similitud textual semántica.

Los sistemas de recuperación de información basados en *embeddings* reciben una entrada del usuario en forma de consulta. Luego, el sistema procesa todas las consultas y genera *embeddings* vectoriales que ayudan a comparar la consulta con la colección de documentos del corpus. Los *embeddings* de la consulta y del documento pueden compararse utilizando una variedad de métricas de similitud, como la similitud del coseno o el producto punto. Los documentos relevantes se envían al usuario en orden decreciente de relevancia, lo que ayuda a identificar cuáles resultados son mejores.

2.2. Modelación y diseño

2.3. Detalles de implementación

2.4. Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

- [1] Hannah Ritchie, Edouard Mathieu, Max Roser, and Esteban Ortiz-Ospina. Internet. *Our World in Data*, 2023. <https://ourworldindata.org/internet>. (Citado en la página 1).
- [2] A. Sophia Koepke, Andreea-Maria Oncescu, João F. Henriques, Zeynep Akata, and Samuel Albanie. Audio retrieval with natural language queries: A benchmark study. *IEEE Transactions on Multimedia*, 25:2675–2685, 2021. (Citado en las páginas 1, 13 y 14).
- [3] Bayan Alabdullah, Natalia Beloff, and Martin White. Rise of big data – issues and challenges. In *2018 21st Saudi Computer Society National Computer Conference (NCC)*, pages 1–6, 2018. (Citado en la página 1).
- [4] Christopher D. Manning, Prabhakar Raghavan, and Hinrich Schütze. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, 2008. (Citado en la página 1).
- [5] Carlos Fleitas Aparicio and Marcel E. Sanchez Aguilar. Conf, 2021. (Citado en la página 2).
- [6] Tomas Mikolov, Kai Chen, Gregory S. Corrado, and Jeffrey Dean. Efficient estimation of word representations in vector space. In *International Conference on Learning Representations*, 2013. (Citado en las páginas 2 y 14).
- [7] Jeffrey Pennington, Richard Socher, and Christopher D. Manning. Glove: Global vectors for word representation. In *Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2014. (Citado en las páginas 2 y 15).
- [8] Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, and Kristina Toutanova. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language un-

- derstanding. In *North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2019. (Citado en las páginas 2 y 15).
- [9] Alec Radford and Karthik Narasimhan. Improving language understanding by generative pre-training. 2018. (Citado en la página 2).
 - [10] Shay Palachy Affek. Document embedding techniques, 2019. Accessed on October, 2023. (Citado en la página 2).
 - [11] Jian Zhang. Lecture 5: Multimedia information retrieval, 2007. (Citado en la página 2).
 - [12] Seungheon Doh, Minz Won, Keunwoo Choi, and Juhan Nam. Toward universal text-to-music retrieval. *ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 1–5, 2022. (Citado en las páginas 3, 10, 11 y 13).
 - [13] Federico Simonetta, Stavros Ntalampiras, and Federico Avanzini. Multimodal music information processing and retrieval: Survey and future challenges. *2019 International Workshop on Multilayer Music Representation and Processing (MMRP)*, pages 10–18, 2019. (Citado en las páginas 4, 7 y 9).
 - [14] Markus Schedl, Emilia Gómez, and Julián Urbano. Music information retrieval: Recent developments and applications. *Found. Trends Inf. Retr.*, 8:127–261, 2014. (Citado en las páginas 7, 8 y 11).
 - [15] Francesc Alías, Joan Claudi Socoró, and Xavier Sevillano. A review of physical and perceptual feature extraction techniques for speech, music and environmental sounds. *Applied Sciences*, 6:143, 2016. (Citado en la página 9).
 - [16] Youngmoo E. Kim, Erik M. Schmidt, Raymond Migneco, Brandon G. Morton, Patrick Richardson, Jeffrey J. Scott, Jacquelin A. Speck, and Douglas Turnbull. State of the art report: Music emotion recognition: A state of the art review. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2010. (Citado en la página 9).
 - [17] Safaa Allamy and Alessandro Lameiras Koerich. 1d cnn architectures for music genre classification. *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 01–07, 2021. (Citado en la página 9).

- [18] M AthulyaK and S. Sindhu. Deep learning based music genre classification using spectrogram. *Social Science Research Network*, 2021. (Citado en la página 9).
- [19] Lvyang Qiu, Shuyu Li, and Yunsick Sung. Dbtmpe: Deep bidirectional transformers-based masked predictive encoder approach for music genre classification. *Mathematics*, 2021. (Citado en la página 9).
- [20] Quazi Ghulam Rafi, Mohammed Noman, Sadia Zahin Prodhan, Sabrina Shajeen Alam, and Dipannitya Nandi. Comparative analysis of three improved deep learning architectures for music genre classification. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 13:1–14, 2021. (Citado en la página 9).
- [21] Shweta Koparde, Vaishnavi R Bhadgaonkar, Kalyani N Patil, Gauri N Basutkar, and Dhanashri D Gayke. A survey on music genre classification using machine learning. 2021. (Citado en la página 9).
- [22] Ndiatenda Ndou, Ritesh Ajoodha, and Ashwini Jadhav. Music genre classification: A review of deep-learning and traditional machine-learning approaches. *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, pages 1–6, 2021. (Citado en la página 9).
- [23] Shajin Prince, Justin Jojoy Thomas, Sharon Jostana J, Kakarla Preethi Priya, and J Joshua Daniel. Music genre classification using deep learning - a review. *2022 6th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, pages 1–5, 2022. (Citado en la página 9).
- [24] Ilaria Manco, Emmanouil Benetos, Elio Quinton, and György Fazekas. Contrastive audio-language learning for music. *ArXiv*, abs/2208.12208, 2022. (Citado en las páginas 10, 11, 12 y 13).
- [25] Kosetsu Tsukuda, Keisuke Ishida, and Masataka Goto. Lyric jumper: A lyrics-based music exploratory web service by modeling lyrics generative process. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2017. (Citado en la página 10).
- [26] Jongpil Lee, Nicholas J. Bryan, Justin Salamon, Zeyu Jin, and Juhan Nam. Disentangled multidimensional metric learning for music similarity. *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics*,

- Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 6–10, 2020. (Citado en la página 10).
- [27] Bochen Li and Aparna Kumar. Query by video: Cross-modal music retrieval. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2019. (Citado en la página 10).
 - [28] Parth Patel. Music retrieval system using query-by-humming. 2021. (Citado en la página 10).
 - [29] Bhaskar Mitra and Nick Craswell. Neural models for information retrieval. *ArXiv*, abs/1705.01509, 2017. (Citado en las páginas 10, 11 y 14).
 - [30] Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Geoffrey E. Hinton. Deep learning. *Nature*, 521:436–444, 2015. (Citado en las páginas 10 y 11).
 - [31] Dzmitry Bahdanau, Kyunghyun Cho, and Yoshua Bengio. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. *CoRR*, abs/1409.0473, 2014. (Citado en la página 11).
 - [32] Li Deng and Dong Yu. Deep learning: Methods and applications. *Found. Trends Signal Process.*, 7:197–387, 2014. (Citado en la página 11).
 - [33] Geoffrey E. Hinton, Liya Deng, Dong Yu, George E. Dahl, Abdel rahman Mohamed, Navdeep Jaitly, Andrew W. Senior, Vincent Vanhoucke, Patrick Nguyen, Tara N. Sainath, and Brian Kingsbury. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29:82–97, 2012. (Citado en la página 11).
 - [34] Michael J. Taylor, Hugo Zaragoza, Nick Craswell, Stephen E. Robertson, and Christopher J. C. Burges. Optimisation methods for ranking functions with multiple parameters. In *International Conference on Information and Knowledge Management*, 2006. (Citado en la página 11).
 - [35] Bhaskar Mitra, Fernando Diaz, and Nick Craswell. Learning to match using local and distributed representations of text for web search. *Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web*, 2016. (Citado en la página 11).
 - [36] Qingqing Huang, Aren Jansen, Joonseok Lee, Ravi Ganti, Judith Yue Li, and Daniel P. W. Ellis. Mulan: A joint embedding of music audio

- and natural language. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2022. (Citado en las páginas 11, 13 y 14).
- [37] Ja-Hwung Su, Tzung-Pei Hong, Yu-Tang Chen, and Chu-Yu Chin. High-performance content-based music retrieval via automated navigation and semantic features. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 115:105267, 2022. (Citado en la página 11).
 - [38] Òscar Celma, Perfecto Herrera, and Xavier Serra. Bridging the music semantic gap. 2006. (Citado en la página 11).
 - [39] Òscar Celma, Perfecto Herrera, and Xavier Serra. A multimodal approach to bridge the music semantic gap. In *International Conference on Semantics and Digital Media Technologies*, 2006. (Citado en la página 11).
 - [40] Sergio Oramas, Luis Espinosa-Anke, and Shuo Zhang. Natural language processing for mir, 2016. Accessed on November, 2023. (Citado en la página 12).
 - [41] Sergio Oramas, Luis Espinosa Anke, Mohamed Sordo, Horacio Saggon, and Xavier Serra. Information extraction for knowledge base construction in the music domain. *Data Knowl. Eng.*, 106:70–83, 2016. (Citado en la página 12).
 - [42] Sergio Oramas, Mohamed Sordo, Luis Espinosa Anke, and Xavier Serra. A semantic-based approach for artist similarity. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2015. (Citado en la página 12).
 - [43] Sergio Oramas, Francesco Barbieri, Oriol Nieto, and Xavier Serra. Multimodal deep learning for music genre classification. *Trans. Int. Soc. Music. Inf. Retr.*, 1:4–21, 2018. (Citado en la página 12).
 - [44] Rémi Delbouys, Romain Hennequin, Francesco Piccoli, Jimena Royo-Letelier, and Manuel Moussallam. Music mood detection based on audio and lyrics with deep neural net. *ArXiv*, abs/1809.07276, 2018. (Citado en la página 12).
 - [45] Byungsoo Jeon, Chanju Kim, Adrian Kim, Dongwon Kim, Jangyeon Park, and Jung-Woo Ha. Music emotion recognition via end-to-end multimodal neural networks. In *RecSys Posters*, 2017. (Citado en la página 12).

- [46] Ilaria Manco, Emmanouil Benetos, Elio Quenton, and György Fazekas. Muscaps: Generating captions for music audio. *2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 1–8, 2021. (Citado en las páginas 12 y 13).
- [47] Tianuhi Cai, Michael Mandel, and Di He. Music autotagging as captioning. In *NLP4MUSA*, 2020. (Citado en la página 12).
- [48] Brian Whitman and Ryan M. Rifkin. Musical query-by-description as a multiclass learning problem. *2002 IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing.*, pages 153–156, 2002. (Citado en la página 12).
- [49] Keunwoo Choi, György Fazekas, and Mark B. Sandler. Automatic tagging using deep convolutional neural networks. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*, 2016. (Citado en la página 12).
- [50] Jongpil Lee, Jiyoung Park, Keunhyoung Luke Kim, and Juhan Nam. Sample-level deep convolutional neural networks for music autotagging using raw waveforms. *ArXiv*, abs/1703.01789, 2017. (Citado en la página 12).
- [51] Jordi Pons, Oriol Nieto, Matthew Prockup, Erik M. Schmidt, Andreas F. Ehmann, and Xavier Serra. End-to-end learning for music audio tagging at scale. *ArXiv*, abs/1711.02520, 2017. (Citado en la página 12).
- [52] Chao Jia, Yinfei Yang, Ye Xia, Yi-Ting Chen, Zarana Parekh, Hieu Pham, Quoc V. Le, Yun-Hsuan Sung, Zhen Li, and Tom Duerig. Scaling up visual and vision-language representation learning with noisy text supervision. In *International Conference on Machine Learning*, 2021. (Citado en la página 14).
- [53] Alec Radford, Jong Wook Kim, Chris Hallacy, Aditya Ramesh, Gabriel Goh, Sandhini Agarwal, Girish Sastry, Amanda Askell, Pamela Mishkin, Jack Clark, Gretchen Krueger, and Ilya Sutskever. Learning transferable visual models from natural language supervision. In *International Conference on Machine Learning*, 2021. (Citado en la página 14).
- [54] Arsha Nagrani, Paul Hongsuck Seo, Bryan Seybold, Anja Hauth, Santiago Manén, Chen Sun, and Cordelia Schmid. Learning audio-video modalities from image captions. In *European Conference on Computer Vision*, 2022. (Citado en la página 14).

- [55] Konstantinos Drossos, Samuel Lipping, and Tuomas Virtanen. Clotho: an audio captioning dataset. *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 736–740, 2019. (Citado en la página 14).
- [56] Chris Dongjoo Kim, Byeongchang Kim, Hyunmin Lee, and Gunhee Kim. Audiocaps: Generating captions for audios in the wild. In *North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2019. (Citado en la página 14).
- [57] J. Brundha and K. N. Meera. Vector model based information retrieval system with word embedding transformation. *2022 10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-22)*, pages 01–04, 2022. (Citado en la página 14).
- [58] Ye Yuan. Improving information retrieval by semantic embedding. 2020. (Citado en las páginas 14 y 15).
- [59] Nils Reimers and Iryna Gurevych. Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks. In *Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2019. (Citado en la página 15).