



Creación e Implementación Didáctica de Simulaciones Interactivas para la Enseñanza de Fenómenos Astrofísicos

Agustín Vallejo Villegas

Asesores:

Pablo Cuartas Restrepo

Universidad de Antioquia

Laura Catalina Arboleda

Institución Universitaria Digital de Antioquia

Trabajo de Grado

Pregrado de Astronomía

Universidad de Antioquia

2022

Agradecimientos

A mi madre Gloria y mi padre Diego, que sembraron desde mis primeros pasos las semillas de lo que hoy soy: el amor a la ciencia, al arte, y a la vida. Ellos, junto con mi hermano Miguel, siempre han sido referentes del tipo de ser humano que quiero ser.

A Antonia, que me ha acompañado hasta el fin de las galaxias, y con quién he podido descubrir nuevos colores y melodías.

Ángela Pérez y el equipo del Planetario de Medellín, que me permitieron tener una educación astronómica más integral, siempre acogiendo mi crecimiento como divulgador de ciencia. Y donde conocí amigos invaluable como Maiky, Jero, Caro y Michi.

A mis asesores: Pablo Andrés Cuartas, ser humano que siempre he admirado por su completez y sabiduría; Laura Arboleda, que incluso durante la pandemia, nos demostró que aún se puede enseñar con pasión; y a mis ocasionales mentores, Daniel Alejandro Valderrama y Diana López, que con mucha paciencia me encaminaron más de una vez. A todos ellos agradezco de corazón el mostrarme que se puede, e incluso se debe, investigar sobre educación en la ciencia.

A Leonardo Pachón, que me permitió vivir el mundo de la programación en forma, y siempre me creyó para potenciar cuanta idea se me ocurrió en Miriam, cursos de Python, o invitar al premio Nobel. También fue una de las chispas que me motivó a empezar a programar juegos y simulaciones, que a la larga me hizo encontrar al equipo de PhET, del cual hacer parte también ha sido un sueño hecho realidad.

A todos los maestros y maestras de AstroMAE que se interesaron en aplicar y probar las simulaciones en sus aulas, junto con los voluntarios del pregrado de astronomía, que participaron como divulgadores en las clases de control de astrofísica estelar.

A mi copiloto artificial, que me ayudó en muchos desafíos de programación, y a Póker.

Resumen

En este trabajo se abordaron algunas temáticas de astronomía y astrofísica que, según la literatura, presentaban una ausencia de intervenciones educativas en Colombia y el mundo. Alrededor de estas temáticas, se desarrolló una serie de simulaciones interactivas, 12 de ellas fueron publicadas en internet¹. La herramienta elegida para el desarrollo, después de explorar múltiples alternativas, fue JavaScript, con las librerías P5 y WebGL, y el despliegue a la web fue realizado con GitHub Pages.

Basándonos en los modelos pedagógicos de aprendizaje por indagación, se diseñó y aplicó una secuencia didáctica con la simulación de *Evolución Estelar*. Se evaluó el aprendizaje que tuvieron estudiantes de bachillerato en dicha clase a través de una prueba, aplicada antes y después de la intervención. Los resultados se compararon con los de otros grupos, cuya clase fue dictada por estudiantes divulgadores del pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia.

Se pudo evidenciar una ganancia en el aprendizaje sobre evolución estelar con todos los estudiantes evaluados (N=186). La clase con la simulación (N=97), guiada por docentes que no contaban con experiencia en el tema, reportó un puntaje ligeramente mayor al obtenido por la clase con divulgadores expertos (N=89). Esto quiere decir que, bajo el criterio de la prueba de conocimientos construida, la clase con la simulación de evolución estelar fue igual de efectiva para generar aprendizaje, si no mejor, que una clase con divulgadores de astronomía.

Abstract

In this work, we addressed some topics of astronomy and astrophysics that, according to the literature, showed an absence of educational interventions in Colombia and the world. Around these themes, a series of interactive simulations were developed, 12 of them were published on the internet. The tool chosen for development, after exploring multiple alternatives, was JavaScript, with the P5 and WebGL libraries, and web deployment was achieved with GitHub Pages.

Based on the pedagogical models of inquiry learning, a didactic sequence was designed and applied with the simulation of *Stellar Evolution*. The learning gain that high school students had in said class was evaluated through a test, applied before and after the intervention. The results were compared with those of other groups, whose class was taught by science communicators, students from the astronomy undergraduate program at the University of Antioquia.

It was possible to show a net learning gain on stellar evolution with all the students surveyed (N=186). The class with the simulation (N=97), guided by teachers who did not have experience in the subject, reported a score slightly higher than that obtained by the class with expert communicators (N=89). This means that, under the criterion of the knowledge test, the class with the stellar evolution simulation was as effective in generating learning, if not better, than a class with astronomy communicators.

¹ <https://agustinvallejo.github.io/games.html>

Tabla de contenidos

| | |
|---|----------|
| Creación e Implementación Didáctica de Simulaciones Interactivas para la Enseñanza de Fenómenos Astrofísicos | 1 |
| 1. Introducción | 6 |
| 2. Estado de la educación en astronomía | 8 |
| 3. Pedagogía y Didáctica del uso de Simulaciones | 11 |
| 3.1. Referentes de simulaciones interactivas | 12 |
| 3.1.1. PhET | 13 |
| 3.1.2. Astro UNL | 15 |
| 3.1.3. Star in a Box | 17 |
| 3.2. Participación en el SSEA Barcelona | 17 |
| 4. Cómo programar una Simulación Interactiva | 18 |
| 4.1. Herramientas exploradas | 18 |
| 4.1.1. Scratch - Programación para niños | 18 |
| 4.1.2. Python y Processing.py | 19 |
| 4.1.3. Motores de videojuegos Godot y Unity | 20 |
| 4.1.4. P5 y JavaScript | 20 |
| 4.1.5. WebGL | 21 |
| 4.1.6. Despliegue con GitHub Pages | 21 |
| 4.2. Arquitectura del Código | 22 |
| 4.2.1. Contraste con código PhET | 22 |
| 5. Simulaciones Astrofísicas desarrolladas | 24 |
| 5.1. Evolución Estelar | 24 |
| 5.2. Órbitas Planetarias | 27 |
| 5.3. Líneas de Absorción | 29 |
| 5.4. Sistema Tierra – Luna | 33 |
| 5.5. Monturas de Telescopios | 36 |
| 5.6. Movimientos del Sol | 39 |
| 5.7. Esfera Celeste | 42 |
| 5.8. Centelleo Estelar | 43 |
| 5.9. Rocas Espaciales | 44 |
| 5.10. Radiación de Cuerpo Negro | 46 |
| 5.11. Heliocentrismo y Geocentrismo | 48 |
| 5.12. Trigonometría Interactiva | 49 |
| 5.13. Otras simulaciones no desplegadas y prototipos | 50 |
| 6. Estrategias pedagógicas con la simulación de Evolución Estelar | 53 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.1. | Alcance de la simulación | 53 |
| 6.1.1. | Pruebas de diseño | 55 |
| 6.2. | Secuencia didáctica | 56 |
| 7. | Experimentos | 58 |
| 7.1. | Población | 58 |
| 7.2. | Secuencia experimental | 58 |
| 7.3. | Clase con Divulgador | 59 |
| 7.4. | Clase con Simulación | 59 |
| 7.5. | Cuestionario | 59 |
| 8. | Análisis de Resultados | 61 |
| 8.1. | Resultados generales | 61 |
| 8.2. | Análisis por pregunta | 61 |
| 8.2.1. | Preguntas problemáticas | 64 |
| 8.2.2. | Preguntas aceptadas | 68 |
| 8.3. | Comparación de pre-test y post-test | 71 |
| 8.4. | Respuestas de la secuencia didáctica | 73 |
| 8.5. | Percepción de los estudiantes | 73 |
| 8.6. | Percepción de los maestros | 76 |
| 8.7. | Impacto de los divulgadores | 77 |
| 9. | Conclusiones | 78 |
| 10. | Referencias bibliográficas | 81 |
| | Apéndices | 84 |
| | A - Secuencia Didáctica | 84 |
| | B - Inventario de Conceptos | 88 |
| | C - Poster SSEA 2022 | 89 |
| | D - Respuestas de la secuencia didáctica | 90 |
| | E - Secuencia Didáctica de Movimientos del Sol | 93 |

1. Introducción

Se tiene la concepción de que la astronomía, al ser el estudio del universo, es una ciencia que está entre las estrellas. Sin embargo, al igual que todas las actividades humanas, la astronomía no es más que un sistema de conocimientos sociales, un artefacto cultural que también está permeada por los contextos socioculturales que la producen (Ruiz-Reyes, 2010). Como tal, también necesita posicionarse como un paradigma relevante, digno de ser estudiado, enseñado, y digno de atención e inversión estatal. Los científicos, entonces, también son responsables de conectar sus conocimientos con los diversos ámbitos de la sociedad, tarea que se dificulta, entre otras, por cuestiones como: la imposibilidad de traer los fenómenos astrofísicos a los distintos estadios divulgativos; la falta de implementación de herramientas tecnológicas, que puedan asistir a educadores en la enseñanza de conceptos más complejos de astronomía; la desconexión entre la academia investigativa y el resto de actores educativos, lo cual a su vez conlleva a una falta de preparación docente en temas astronómicos.

Bajo esta premisa, se crearon 12 simulaciones interactivas, disponibles en internet², y otros cuantos prototipos sin desplegar. Esto con el fin de facilitar la labor de enseñar conceptos astrofísicos a través de la tecnología. Para ello, hubo que explorar a profundidad el campo del desarrollo de simulaciones, intentando con múltiples lenguajes de programación y herramientas, hasta llegar al producto final.

Se evaluó el impacto de una de las simulaciones en la enseñanza de conceptos claves sobre evolución estelar, a través del diseño e implementación de una clase con aprendizaje por indagación. Para esto se diseñó una secuencia didáctica que tenía a la simulación como herramienta central, que invitaba a la recolección de datos físicos sobre estrellas. La secuencia se probó con estudiantes de secundaria básica y media y los resultados fueron comparados con una estrategia de enseñanza tradicional.

Este proyecto se enmarca en una propuesta Ciencia-Tecnología-Sociedad. Se ilustra primero el panorama de la educación astronómica a nivel internacional y local, luego se muestran las tecnologías que se enfocan en abordar el proceso de enseñanza, y finalmente se realiza una intervención didáctica de estas tecnologías en el aula.

El capítulo 2 es un recorrido por el estado actual de la enseñanza de la astronomía en Colombia y en el mundo, mostrando los logros, retos y algunas de las ideas que los investigadores sugieren al respecto. A partir de ello, se analiza cuáles son las temáticas con mayor necesidad de innovación didáctica, sea por su dificultad de enseñanza, su presencia en los currículos, o falta de preparación docente para enseñarlas. Son estas temáticas sobre las cuales se realizará una intervención tecnológica, diseñando las simulaciones que más adelante son descritas.

Tras hablar de la educación en astronomía, discutimos en el capítulo 3 las investigaciones que se han realizado sobre la implementación de nuevas tecnologías para la educación de la ciencia en general. Específicamente, sobre procesos de gamificación del aula, o el uso de aplicaciones que dinamicen el proceso de enseñanza. ¿Han sido estas tecnologías de utilidad para la enseñanza de conceptos difíciles? y ¿cómo pueden funcionar como herramientas de accesibilidad de la información?

² <https://agustinvallejo.github.io/games.html>

Luego, es pertinente estudiar las herramientas ya existentes, pues estas son un precedente para la creación de las propias, tanto en las indicaciones de diseño, como en la ausencia temática que pueda hallarse. Se mostrará un compendio de simulaciones interactivas de ciencia que son utilizadas alrededor del mundo en el ámbito educativo. Y en particular, se profundizará en la experiencia de uno de los sitios de simulaciones más populares: PhET³, debido a su amplia documentación sobre cómo empezar a programar estas herramientas, cómo diseñarlas en temas de interactividad o accesibilidad, y cómo aplicarlas en el aula según lineamientos pedagógicos.

La contextualización nos llevará a la parte tecnológica del trabajo, donde se profundizará en el recorrido que se tuvo para desarrollar las simulaciones, pasando por las diversas herramientas y lenguajes de programación disponibles. Se comentará cómo se adoptaron las diversas estrategias de diseño que se encontraron en la investigación del estado del arte, y cuál es la arquitectura de los programas realizados para correr las simulaciones en un navegador.

En el capítulo 5 se hará una presentación de todas las simulaciones realizadas que están disponibles en internet.⁴ Buscando mantener una cercanía con la estructura Ciencia-Tecnología-Sociedad, se profundizará primero sobre el modelo científico del cual se partió para cada simulación, discutiendo incluso qué dice la literatura en algunos casos y cómo las investigaciones científicas nos han llevado a estos saberes. Luego, sobre tecnología se presentará brevemente la estructura del código de cada simulación, buscando que estas no sean cajas negras, sino que pueda ser transparente al menos un esbozo de la lógica utilizada, posiblemente motivando a lectores a crear las propias. Para la parte social, en este caso pedagógica: la experiencia de usuario que se espera lograr, los objetivos de aprendizaje, y preguntas orientadoras, si las hay.

Finalmente, en el capítulo 6, el enfoque social del trabajo viene de la implementación didáctica en el aula, con la simulación de *Evolución Estelar*. Esta se logró con la colaboración de un grupo de maestros voluntarios de varios lugares de Colombia, e incluso de Latinoamérica. Se discutirá el proceso de creación de las pruebas de conocimiento y cómo se evaluó el impacto de las simulaciones comparado con lecciones convencionales.

El interés de este proyecto es abordar la educación en astronomía de una forma novedosa, al menos en el contexto nacional; y explorar las posibilidades que los profesionales en astronomía tenemos para participar de las dinámicas de creación de contenido, investigación en pedagogía, comunicación, y en el desarrollo de herramientas que puedan ser de utilidad para la sociedad. Siempre teniendo en cuenta que también es la responsabilidad de los científicos darles una presencia comunitaria a nuestras labores.

³ <https://phet.colorado.edu/>

⁴ <https://agustinvallejo.github.io/games.html>

2. Estado de la educación en astronomía

La astronomía ha tenido un rol de relevancia oscilante en la historia, siendo a veces portadora de revoluciones ideológicas, a veces relegada a las curiosidades enciclopédicas. Hacia finales del siglo XIX, en Estados Unidos, la astronomía estaba incluida en los programas de formación docente, y de cada 20 instituciones 14 impartían esta asignatura (Hoff, 1990). En Europa, la divulgación de ciencia y astronomía se encontraba en su “edad de oro”, popularizándose cada vez más entre la población (Ruiz-Reyes 2010). Mientras tanto, en Colombia, esta ciencia se encontraba en un esfuerzo por reconocerse como un saber práctico, que pudiera ayudar a las intenciones de progreso e industrialización nacional. Sus principales impulsores para la época eran la ingeniería, las fuerzas militares y navales, y las autoridades eclesiásticas (Arias de Greiff, 1987; Ruiz-Reyes 2010).

En cabeza de personajes como José María González Benito y Julio Garavito Armero, ambos directores del Observatorio Nacional e ingenieros civiles, se llevaba a cabo una primitiva divulgación de astronomía. Aparecieron en Colombia “calendarios, almanaques, periódicos, revistas, poemas, conferencias públicas e iniciativas de enseñar la astronomía en las escuelas primarias” (Ruiz-Reyes 2010). Entre estas últimas, se encontraban manuales de enseñanza que enfatizaban la importancia de la astronomía para que los estudiantes entendieran la estructura de la creación de Dios, evidenciando el contexto conservador y religioso que permeaba la sociedad colombiana. El mismo presidente Rafael Núñez afirmaba en 1880: “*Será imposible estudiar atentamente con el telescopio el sistema planetario sin adquirir la convicción de que la disciplina es una ley providencial que no puede infringirse sin desastre*” (Ruiz-Reyes 2010).

Para el siglo XX, la astronomía pasa a tener presencia en la Universidad Nacional en Bogotá con la construcción de la estación astronómica de la ciudad universitaria en 1952; con la creación de la facultad de ciencias en 1965, y luego con la sede del Observatorio Nacional (Arias de Greiff, 1987). Tiempo después aparecen doctorados y maestrías en astrofísica en la misma universidad; así como el pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia en el año 2008, formalizando aún más el estudio de esta disciplina. El interés en la astronomía también resurge a mediados del siglo debido a eventos históricos como la carrera espacial (Hoff, 1990), y su presencia en los currículos escolares empieza a tener cada vez más relevancia.

De acuerdo con Fraknoi (2014), las investigaciones sobre educación de la astronomía empezaron a aparecer alrededor de 1930, pero por mucho tiempo no existió una revista internacional que convocara astrónomos y educadores. Se publicaban en revistas de astronomía, donde los lectores suelen ser investigadores dedicados a otros temas; en revistas de educación de la física, donde los muchos asuntos experimentales podían esconder los ocasionales artículos astronómicos; o en revistas exclusivas de educación, donde los docentes suscritos posiblemente no tenían interés en desarrollar la astronomía en las aulas. Para afrontar esta carencia académica, nace en 2001 la revista *Astronomy Education Review*⁵. Sin embargo, para 2013 el número de estudios que recibía la revista no fue suficiente para mantenerla a flote, lo que causó su cierre. En 2014 nace el *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education*⁶,

⁵ https://access.portico.org/Portico/loviView?cs=ISSN_15391515&content=E-Journal%20Content

⁶ <https://clutejournals.com/index.php/JAESE>

que sigue publicando anualmente. Asimismo, en 2021 se publicó la primera edición de la *Astronomy Education Journal*⁷, de la IAU.

Tras analizar artículos sobre educación presentados en encuentros de la IAU entre 1988 y 2006, Bretones (2011) concluye que es necesario profundizar en epistemología de la ciencia, y que la mayoría de dichos estudios carecen de una descripción sólida del proceso de enseñanza y aprendizaje. Asimismo, Bailey (2011) también muestra que son pocas las investigaciones de educación en astronomía que pueden concluir alrededor de significancia estadística de sus datos, o que cuenten con experticia en psicología cognitiva y otras áreas, como pedagogía. Ambos consideran que hay mucho por hacer en esta rama investigativa, pues al ser la astronomía tan amplia, abarca muchos niveles educativos y de diversa complejidad.

Las pruebas estandarizadas de astronomía también se empezaron a usar para determinar niveles de aprendizaje de distintas estrategias pedagógicas, así como concepciones alternativas o ideas incorrectas que pudieran tener los estudiantes. Bailey (2011) describe diez estudios que hacen uso de pruebas estandarizadas, sólo seis de los cuales hacen análisis estadísticos de sus resultados, y ninguno aporta los insumos que serían necesarios para un meta-estudio pedagógico.

En relación a las concepciones alternativas sobre astronomía, después de aplicar una prueba estandarizada a 1104 estudiantes, Slater et al. (2015) encontró que las principales carencias conceptuales sobre astronomía son los siguientes temas, en paréntesis algunas ideas previas que tenían los estudiantes de cada uno:

- **Evolución estelar***
- **La muerte del sol*** (El sol nunca va a morir / el sol explotará)
- **Contenido del sistema solar*** (Las estrellas que vemos están dentro del sistema solar / los asteroides pueden tener el mismo tamaño que un planeta)
- **Cómo funciona la gravedad en el espacio***
- **Radiación de cuerpo negro***
- **Cómo se crea la luz**
- **Cómo se forman los átomos**
- **Cómo se expande el universo**

En particular, las temáticas “evolución estelar” y “la muerte del Sol” serán abordadas en detalle en la intervención didáctica; otras de ellas, marcadas con un asterisco (*), son superficialmente trabajadas en varias simulaciones de las desarrolladas en este trabajo. Las demás dan pie para que muchas más herramientas didácticas sean creadas.

Los resultados mencionados anteriormente, sin embargo, fueron obtenidos con una población de estudiantes de pregrado (college) estadounidenses. En la revisión bibliográfica no se encontraron estudios similares realizados en contextos educativos más cercanos a Colombia. De hecho, se encontró que la literatura sobre educación en astronomía existente en Latinoamérica es muy joven y escasa, sólo en 2004 se creó la *Revista Latinoamericana de Educación en Astronomía*⁸. Bretones et al. (2014) expresan que, diez años después, aún no se lograba masa crítica de artículos, y que la mayoría de los artículos seguían proviniendo de Brasil. La situación parece no haber cambiado a 2022, a pesar de ir en su edición número 32: de los últimos 21 artículos publicados, solamente uno de ellos está en un idioma distinto al

⁷ <https://astroedjournal.org/index.php/ijae>

⁸ <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea>

portugués. Esto dificulta, o casi que imposibilita, el fácil acceso a esta información por parte de investigadores o maestros latinoamericanos hispanohablantes.

Frente a la educación de la astronomía en Colombia, Navarrete y Valderrama (2021) realizan una revisión documental de 64 estrategias educativas nacionales disponibles en repositorios de internet. Concluyen, en primer lugar, que los esfuerzos en el área de la pedagogía se encuentran muy centralizados en los postgrados que hay en el país, y estos a su vez están desarticulados con los grupos de ciencia o divulgación, quienes también son actores relevantes en temas de educación. También mencionan que, de los estudios analizados, la gran mayoría aborda temas muy superficiales de astronomía básica, y casi siempre desde el enfoque de las ciencias sociales, dejando inexplorados aspectos más específicos de esta ciencia, como los detalles de la formación de estrellas o galaxias y sus implicaciones cosmológicas más significativas.

En temas de oportunidades de crecimiento, el estudio de Navarrete y Valderrama (2021) también comenta que, solo 12% de las estrategias analizadas desarrolla una implementación didáctica con componentes TIC (algunas de las cuales serán mencionadas en el capítulo 3), y sólo 7% están enfocadas en formación docente, reconociendo que estos son porcentajes muy pobres en Colombia en temas de astronomía. Como ventaja se puede destacar el hecho de que la astronomía sí está presente en los estándares básicos de competencias del Ministerio de Educación Nacional⁹ (Schmidt 2006).

Como se puede ver, la educación de la astronomía en Colombia ha captado la atención de muchos actores a lo largo de la historia, principalmente las academias científicas, que encabezan esta tarea. Este trabajo parte de la hipótesis de que las herramientas digitales pueden ser también aliadas del docente, que democratizan y descentralizan la enseñanza de estos contenidos. A continuación, veremos los fundamentos pedagógicos y didácticos del uso de simulaciones interactivas, así como las diversas investigaciones que se han hecho en este campo.

⁹https://www.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/files_public/2022-06/Estandares_basicos_competencias-min.pdf

3. Pedagogía y Didáctica del uso de Simulaciones

La forma usual de enseñar ciencia en las escuelas y en universidades ha estado influenciada por modelos pedagógicos conductistas. Esto significa que las clases han venido siendo cátedras de memorización de datos y procedimientos, sin ninguna asociación entre los conceptos, ni formación en pensamiento crítico o científico (Clark et al. 2009; Holmes et al. 2015; Mayoral 2020). Son necesarias intervenciones educativas que permitan a los estudiantes ser verdaderos actores de su proceso formativo, más allá de tomar notas en una clase. En particular, estrategias como el *aprendizaje por indagación* han sido alternativas que han demostrado su efectividad para permitir a los estudiantes construir conceptos científicos a partir del análisis de la evidencia, y llegando a consensos colectivos con sus compañeros de clase, con el acompañamiento de sus maestros. Este modelo pedagógico se basa en los más recientes modelos de la psicología cognitiva sobre cómo aprende el ser humano (Wieman 2014).

Precisamente para responder a esa carencia de metodologías activas en la educación tradicional, se viene investigando desde hace algunos años el impacto de juegos y simulaciones como herramientas de aprendizaje activo (Honey & Hilton 2011). Los logros que han tenido estos insumos didácticos han sido, entre otros: reducir las brechas en logros académicos, sostener la motivación e interés, y priorizar el aprendizaje significativo de los estudiantes (Bertram 2020), así como introducir a estudiantes jóvenes a conceptos físicos, permitiéndoles interactuar con éstos y generar procesos mentales de más alto nivel (Falloon 2019; Papastergiou 2019). Además, Susman & Pavlin (2020) encuentran que este tipo de estrategias didácticas puede incluso mejorar el aprendizaje de los conceptos por parte de los mismos maestros.

Comúnmente se definen simulaciones, en el ámbito educativo, como modelos computacionales que permiten a un usuario interactuar con ciertos fenómenos, modificando los parámetros relevantes para la evolución del evento, y observando las consecuencias (Clark et al. 2009). Y desde el auge del mundo digital, ha venido en aumento el interés por la creación de simulaciones educativas que puedan complementar las experiencias de aprendizaje dentro y fuera del aula, e integrarse en las estrategias institucionales de enseñanza como una herramienta poderosa (Honey & Hilton 2011). Por otra parte, están los juegos digitales, que suelen tener un enfoque que gira en torno a logros, puntajes, o alcanzar la victoria. Aunque una simulación no es propiamente un juego, la mayoría de investigaciones de la didáctica de herramientas digitales suelen agruparlas, hablando del impacto educativo de “simulaciones y juegos”.

El aumento de la relevancia de estas herramientas en la educación, según Van Eck et al. (2006), se ha debido principalmente a tres factores: Primero, al hecho de que los nativos digitales cada vez están más desligados de los métodos tradicionales de enseñanza, y más conectados con las nuevas tecnologías del entretenimiento; segundo, al aumento de la popularidad de estas tecnologías en forma de consolas de videojuegos, teléfonos inteligentes, y el acceso a computadores personales. Añadiendo sobre este punto, hoy en día, con los aprendizajes de una pandemia, se agregan a esta lista tecnologías como realidad virtual, realidad aumentada, domótica y robótica, cada vez más presentes en la vida cotidiana y también en propuestas didácticas (Stefko et al. 2022; Laskey 2022).

El tercer elemento que Van Eck et al. (2006) mencionan para explicar el auge de estas tecnologías es el interés creciente entre los mismos investigadores, quienes se han tomado la tarea de evaluar el impacto educativo de esas herramientas, muchos de ellos buscando encontrar

evidencia rotunda que soporte la superioridad de las simulaciones y juegos sobre los modelos convencionales de enseñanza.

Precisamente respecto a estas investigaciones, Honey & Hilton (2011) afirman que no han logrado alcanzar la velocidad a la que crece el campo, y que en el diseño y aplicación de las simulaciones aún falta considerar fuertemente los objetivos de aprendizaje y cómo se abordarán en el diseño de la herramienta. Asimismo, explican que las estrategias de evaluación y rediseño deben permitirle a la simulación evolucionar, e incluso deberían poder ser aplicadas en futuras investigaciones para considerar meta-estudios que aborden un impacto más global de las estrategias en cuestión.

En un estudio más reciente, Bertram (2020) muestra un panorama similar: la mayoría de las investigaciones en el campo están desconectadas de la metodología de investigación de esta área, y no utilizan elementos como grupos de estudio y de control, pruebas estandarizadas de conocimientos, etc. Lo cual aumenta la dificultad de realizar meta-estudios que concluyan sobre la efectividad de las herramientas. Además, enfatiza en la necesidad de realizar los estudios de la mano con científicos cognitivos, psicólogos y educadores, requisito que muchas veces está por fuera de los alcances o intereses de los investigadores, lo cual perjudica la eficacia del estudio.

Bertram (2020) también abre la discusión sobre las principales falencias que estas tecnologías pueden tener: primero, por definición, no tienen un componente corporal, que es un aspecto importante al momento de aprender; aunque por lo general, en clases tradicionales tampoco se aborda. La simulación, además, no se adapta a las emociones y reacciones del estudiante y el grupo, como quizá un maestro sí podría hacerlo; aunque también discute sobre algunas herramientas tecnológicas que han empezado a abordar el tema de diseño adaptativo. Finalmente, la simulación requiere tiempo y dinero para ser creada, por lo que este campo de estudio esencialmente depende de los pocos grupos que están desarrollando simulaciones para uso público. Y aunque Van Eck (2006), dentro de las estrategias para la gamificación, menciona que estudiantes y/o maestros sean los autores de los juegos, también reconoce que en pocos casos es una opción viable, y que casi siempre habría que recurrir a los recursos que crean terceros.

De las investigaciones nacionales que usaban TICs encontradas por Navarrete y Valderrama (2021) se pueden destacar las siguientes: En los trabajos de Peña-Parra (2013) y Gonzalez-Murillo (2016) se crearon objetos virtuales de aprendizaje, integrando tecnologías existentes de observación astronómica como Stellarium a clases sobre astronomía general. Sierra-Sáenz & León-Ibagón (2016) diseñaron una aplicación móvil para enseñar conceptos básicos de astronomía a estudiantes de 8 años. Y, tanto el estudio de Rodríguez-Henao & Díaz-Álvarez (2016) como el de Sarmiento-Borda & Angulo-Cohen (2015) crearon y utilizaron herramientas de realidad aumentada para aplicar en astronomía de colegio. En todas estas investigaciones se concluye que las herramientas tecnológicas, sumadas al tema de astronomía, captan el interés de los estudiantes. Sin embargo, ninguna de ellas hace un análisis cuantitativo que permita medir el nivel de aprendizaje, o compararlo con una clase tradicional.

3.1. Referentes de simulaciones interactivas

La idea de enseñar conceptos científicos a través de juegos y simulaciones digitales no es nueva; sin embargo, existen distintas formas de abordar esa enseñanza. A continuación, se hace

una revisión de algunos de los sitios más reconocidos de simulaciones científicas, al menos las relacionadas con física o astronomía. Varios de estos sitios sirvieron de inspiración y referente para este trabajo. Cabe mencionar que la lista puede hacerse muchísimo más extensa, según qué se entiende por una simulación y lo que se desee enseñar. Por ejemplo, Peña-Parra (2013) identifica más de 40 softwares libres de astronomía, principalmente mapas del cielo nocturno como Stellarium, o sistemas de información geográfica como Google Earth. En este proyecto, no se abordarán este tipo de herramientas, sino las simulaciones interactivas que puedan servir como punto de comparación con el producto a crear.

3.1.1. PhET¹⁰

Para hablar de simulaciones científicas de alto impacto, es necesario mencionar en primer lugar al proyecto PhET (Physics Education Technology) de la Universidad de Colorado en Boulder, creado en 2002 por el Dr. Carl Wieman, galardonado en 2001 con el Premio Nobel de Física. La intención del proyecto es ofrecer una serie de recursos educativos gratuitos que fomenten la alfabetización científica, las estrategias alternativas de didáctica en el aula, y acercar el conocimiento científico a regiones con acceso limitado a textos científicos o laboratorios (Perkins et al. 2006)

Actualmente en el sitio web de PhET se pueden encontrar más de 150 simulaciones de física, matemáticas, química, biología y otras ciencias afines. Cada una de ellas pasa por un detallado proceso de diseño visual, pedagógico y funcional, donde alrededor de 10 personas están involucradas en cada momento de la producción. Todas las simulaciones están acompañadas de una guía para maestros, y múltiples actividades didácticas, diseñadas por los investigadores de PhET o por profesores que han usado la herramienta en sus aulas.

Otro recurso valioso que se ofrece además de las simulaciones es el repositorio de todos los estudios didácticos que se han realizado usando PhET; 20 años de investigaciones en el aula, que han permitido pulir el proceso de hacer que una herramienta interactiva tenga el más alto nivel de impacto y calidad, permitiendo el aprendizaje conceptual de los estudiantes con el uso de ella.

En lo que a diseño se refiere, la ruta que se usa para crear las simulaciones PhET es la siguiente (Perkins et al. 2006):

1. Planteamiento de los objetivos de aprendizaje.
2. Diseño inicial, buscando que la simulación sea coherente y consistente, que tenga un área de juego sin muchas distracciones y que muestre de manera clara el fenómeno, con botones que optimicen la experiencia del usuario permitiéndole descubrir qué hace cada uno.
3. Entrevistas de diseño, generalmente realizada con estudiantes voluntarios que comentan sobre sus percepciones de los elementos de la simulación.
4. Rediseño, tratando de abordar principalmente las percepciones erróneas que los estudiantes hayan podido interpretar de la simulación.
5. Uso en el aula, va acompañado de hojas de trabajo que ayudan al maestro a guiar la clase de acuerdo a los objetivos de aprendizaje.
6. Diseño final.

¹⁰ <https://phet.colorado.edu/en/simulations/browse>

En cuanto a las hojas de trabajo, se sugiere motivar a los estudiantes a hacer comparaciones e hipótesis. Que no respondan solamente con algo que observan del fenómeno, sino que puedan cuantificar y pensar qué tienen que ver sus observaciones con los modelos mentales que puedan tener al respecto. Asimismo, se hace énfasis en la importancia de dar un tiempo libre a los estudiantes para reconocer la simulación y generar sus propias conclusiones e incógnitas respecto a los fenómenos.

Además de las hojas de trabajo, y actividades para maestros, el código de PhET se encuentra disponible en GitHub, incluso con guías de instalación y documentación sobre el uso de las librerías principales que implementan. Esto es una oportunidad muy grande para terceros, que, como nosotros, buscábamos estudiar estas herramientas, ya que permite conocer cómo se maneja la estructura de código de ese proyecto.

Cabe mencionar que, en el marco de la presente investigación, buscando hablar con los miembros de PhET, tuve la inmensa oportunidad de recibir una oferta laboral como desarrollador de software en el equipo. Al momento de escribir este trabajo, nos encontramos en proceso de desarrollar una simulación enfocada en las leyes de Kepler, llamada *My Solar System* (ver Figura 1).

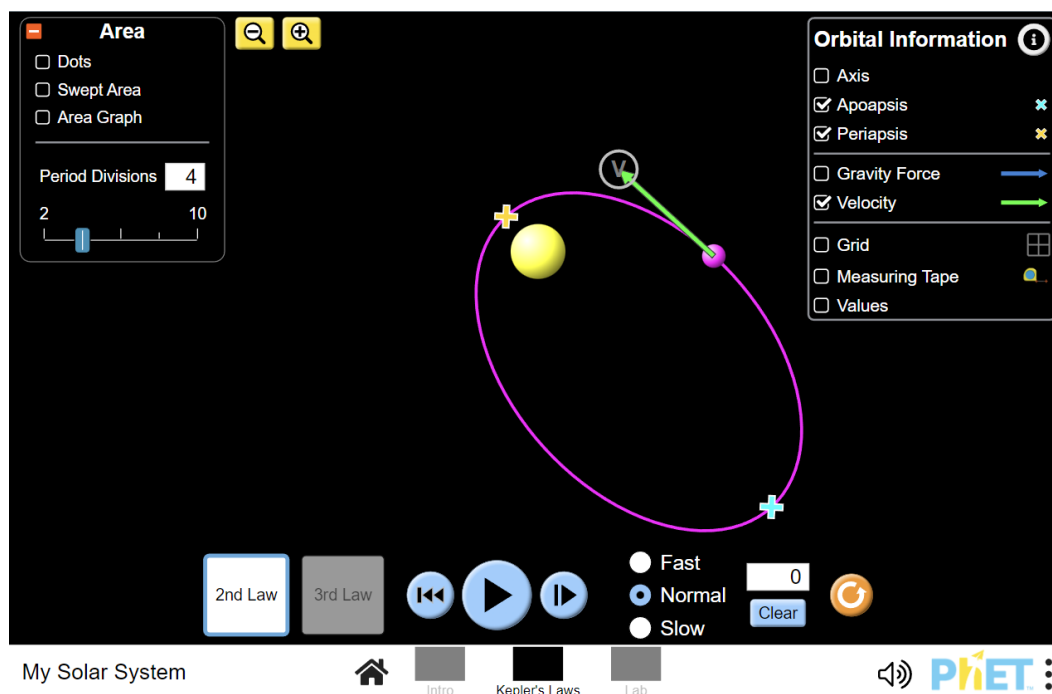


Figura 1. Prototipo de la simulación My Solar System en una fase de prototipo. Las simulaciones PhET cuentan con diversos controles que permiten la interacción con la simulación y la información que esta puede mostrar, potenciando las ideas de aprender indagando.

3.1.2. Astro UNL¹¹

La Universidad de Nebraska-Lincoln ofrece un conjunto de simulaciones interactivas de astronomía, que busca cubrir todo el contenido que tendría un curso introductorio. Similar a PhET, pero enfocado en astronomía. Cuenta con más de 100 simuladores que cubren temas como astronomía de posición, fotometría, espectroscopía, astrofísica estelar, cosmología, entre otros. Tiene un fuerte énfasis en las ecuaciones que usan los científicos y los diversos análisis de datos que se podrían hacer de los fenómenos, como curvas de luz, gráficas espectroscópicas, etc. Sin duda fue una de las mayores inspiraciones para realizar este proyecto, junto con PhET.

Las simulaciones de astronomía de posición, por ejemplo, proyectan una esfera celeste sobre la cual se dibuja la geometría de diversos fenómenos: el camino del Sol, las estaciones del año, la posición de los planetas, el efecto de la latitud, entre muchos otros. Otras simulaciones hablan del tiempo en astronomía, desde la medición de éste con las estrellas (periodos siderales y sinódicos), hasta incluso relatividad y dilatación del tiempo cosmológico. Hay otras que exploran curvas de luz de supernovas, binarias eclipsantes, estrellas variables, y más. Realmente, es uno de los mejores recursos interactivos para hablar de astronomía a un nivel más profesional, para una carrera universitaria o un diplomado. Es posible que, para aplicar en secundaria, la mayoría de los aplicativos sean muy específicos, pero aun así, muchos de ellos pueden ser de utilidad para los maestros.

Desafortunadamente, no hay estudios publicados alrededor de esta herramienta por sus creadores, solo reportes cortos en reuniones de la Sociedad Americana de Astronomía, y un par de usos independientes, como Ibáñez-Plana (2017) que reporta un aumento en el aprendizaje de conceptos básicos de astronomía comparado con un grupo control. El sitio web tampoco dice mucho de la historia, ni del proceso de diseño y evaluación de las simulaciones. Respecto al equipo creador, solo menciona que es dirigido por el Dr. Kevin Lee y que lo conforman desarrolladores y artistas. Asimismo, aunque la calidad de las herramientas es inmensa, la parte pedagógica del proyecto es ambigua en cuanto a las formas sugeridas de aplicar las simulaciones. Las actividades propuestas parecen sugerir que el profesor muestre las simulaciones y los estudiantes únicamente discutan y respondan.

¹¹ <https://astro.unl.edu/animationsLinks.html>

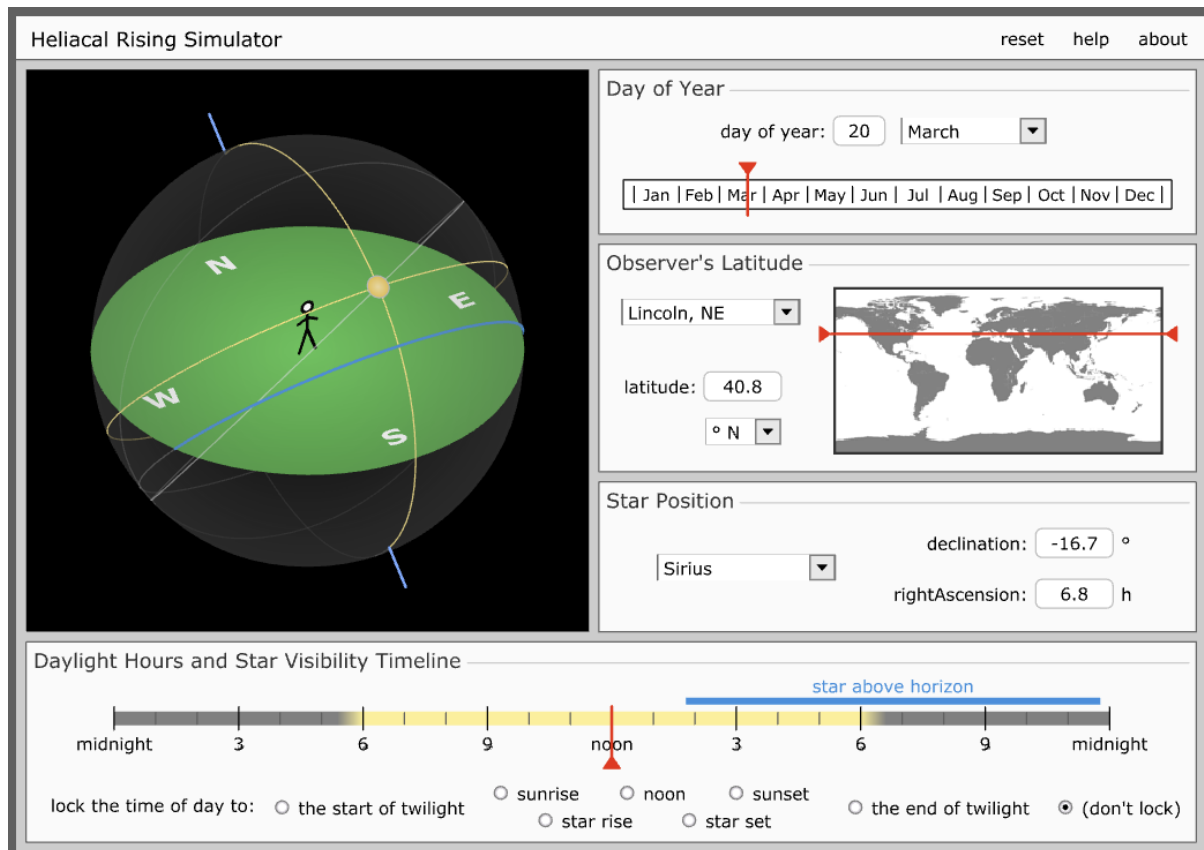


Figura 2. Ejemplo de una simulación de astronomía de posición desarrollada por la Universidad de Nebraska Lincoln¹². Esta permite mover la esfera celeste en tres dimensiones e interactuar con la fecha y ubicación geográfica del observador.

¹² <https://astro.unl.edu/classaction/animations/ancientastro/heliacalrisingsim.html>

3.1.3. Star in a Box¹³

Entre los recursos pedagógicos del Observatorio de Las Cumbres, se encuentra la simulación *Star in a Box*, que trata sobre la evolución de una estrella y su recorrido en el diagrama HR, asimismo cuenta con insumos para maestros.

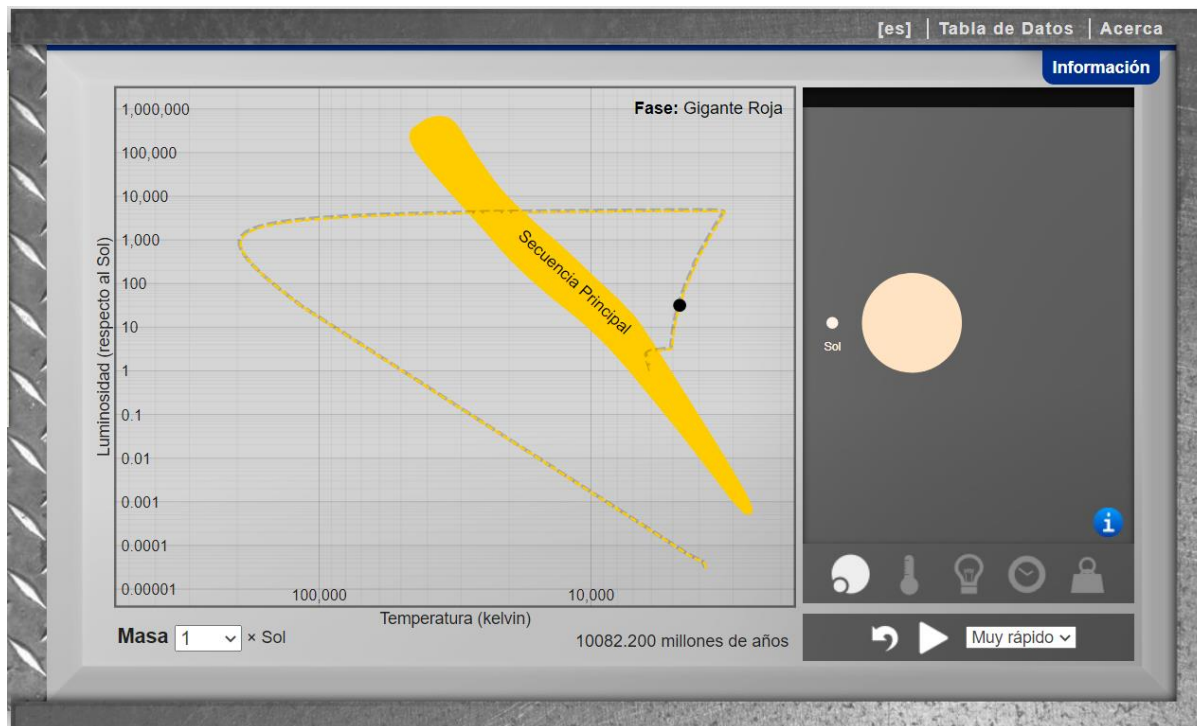


Figura 3. Simulación de *Star in a Box*, que muestra la evolución de estrellas de diversas masas y su movimiento en el diagrama Hertzsprung-Russell, una gráfica que compara la luminosidad de una estrella con su temperatura.

3.2. Participación en el SSEA Barcelona

Entre el 27 y el 29 de abril de 2022, se llevó a cabo el cuarto Symposium on Space Educational Activities (SSEA), en Barcelona. Un avance del presente trabajo fue mostrado en forma de póster en el evento (ver anexo C), buscando exponer lo logrado con las simulaciones y conocer sobre otros trabajos realizados en el campo de la educación en ciencias del espacio. Las actividades educativas presentadas en el congreso eran en su mayoría sobre construcción de cohetes, satélites y diseños de misiones; sobre tecnología hubo dos trabajos relacionados con realidad aumentada y realidad virtual (Stefko et al. 2022; Laskey 2022) y otros dos de integración de herramientas digitales en el aula, como respuesta a la situación de pandemia (Grass et al. 2022; Dubois et al. 2022). El presente trabajo fue el único sobre simulaciones interactivas.

¹³ <https://starinabox.lco.global/>

4. Cómo programar una Simulación Interactiva

Esta sección presenta una discusión alrededor del proceso de creación de las simulaciones. En primer lugar, se comentará sobre la evolución del proceso, las distintas herramientas utilizadas y los acercamientos a estas, además de cuáles podrían ser ideales para el desarrollo de recursos didácticos similares a los mostrados en este trabajo.

4.1. Herramientas exploradas

4.1.1. Scratch - Programación para niños

En una anotación un tanto autobiográfica, pero pertinente, mi primer acercamiento al desarrollo de juegos astronómicos fue, a mis 10 u 11 años, a través del lenguaje de programación para niños, **Scratch**, desarrollado por el *MIT Media Lab*. En su momento, se sentía como un gran logro haber realizado una réplica pequeña del videojuego Asteroids, en la que un jugador evadía cuatro asteroides que rebotaban de un lado a otro de la pantalla.

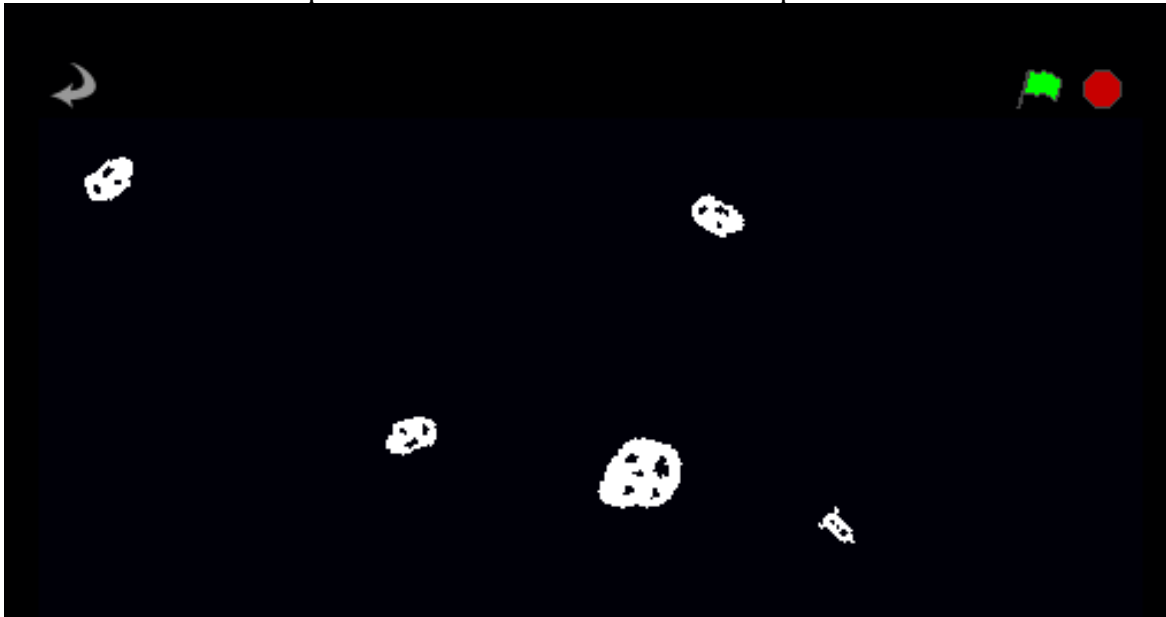


Figura 4. Muestra del videojuego creado con el lenguaje de programación Scratch.

Puede verse como un episodio aislado, y desde entonces no profundicé en programación hasta la universidad, pero también muestra el poder que este tipo de experiencias formativas puede tener a la larga, y las posibilidades de creación que existen para jóvenes interesados. *Scratch* está diseñado para que desde temprana edad se pueda empezar a programar, a través de una interfaz interactiva y divertida, y siembra en muchos de sus usuarios una pasión por el desarrollo, ayudando a ahuyentar la idea de que programar es complicado.



Figura 5. Ejemplo de un “Hola Mundo” creado con Scratch. Tomada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scratch_Hello_World.png

4.1.2. Python y Processing.py

Python fue el punto de partida para el desarrollo de las simulaciones. Pero las librerías disponibles para dicha tarea, *pygame* por ejemplo, son tediosas y poco escalables. Se probó entonces con la herramienta *Processing.py*, que permite desarrollar en Python programas que aprovechan las funcionalidades del lenguaje Processing: Interacción con el mouse y el teclado, creación de figuras primitivas, manejo dinámico del color y las formas, etc.

Processing es una herramienta que fomenta el aprendizaje de programación y dentro de sus características más significativas están su documentación y su comunidad: existen muchos recursos, foros, tutoriales y vídeos que permiten aprender de manera fluida sobre esta herramienta.

En términos generales, un programa visual e interactivo en Processing funciona como un ciclo *while* (conocido en ese contexto como función *draw*) que se ejecuta muchas veces por segundo para pintar la pantalla según las órdenes del algoritmo.



```
def setup():  
    size(480, 120)  
  
def draw():  
    if mousePressed:  
        fill(0)  
    else:  
        fill(255)  
    ellipse(mouseX, mouseY, 80, 80)
```

Figura 6. Ejemplo de un código de Processing en Python. La función *setup* define el tamaño de pantalla. La función *draw* dibuja elipses en la posición del ratón, y si se está presionando se llenan (fill) de color negro (0), de lo contrario se llenan con color blanco (255). Tomado de <https://py.processing.org/tutorials/gettingstarted/>

Las primeras simulaciones realizadas en este programa fueron visualizaciones simples de gravedad, de órbitas elípticas e hiperbólicas, de la curva de radiación de Planck, entre otros. Estos primeros pasos fueron muy enriquecedores al momento de comprender mejor el funcionamiento de este tipo de programas interactivos.

Desafortunadamente, la escalabilidad de *Processing.py* llegó a un límite, pues la herramienta esencialmente traduce el código básico de *Python* a *Java* para correr los programas, imposibilitando el uso de librerías más avanzadas, que es donde está el verdadero poder de *Python*. Además, para que otras personas pudieran ejecutar las simulaciones, estas tenían dos opciones: a) Instalar en sus computadoras *Processing* y configurar el programa para que ejecute código en *Python*. b) Descargar una versión ejecutable (.exe) del programa, que al tener internamente toda la lógica de *Processing*, terminaba siendo un archivo innecesariamente grande.

4.1.3. Motores de videojuegos Godot y Unity

Se experimentó en el proceso de creación con motores de videojuegos, buscando una mayor versatilidad. *Unity* es actualmente el motor de videojuegos gratuito más usado en esa industria, su documentación es buena y también cuenta con una comunidad significativa. Una desventaja es el hecho de que su parte lógica se realiza en *C#*, muy distinto a *Python*, y además al ser tan amplio, la curva de aprendizaje es lenta, dado que hay muchísimas funcionalidades por explorar.

Se optó durante un tiempo por usar *Godot*, otro motor gratuito y open source. En cuanto a accesibilidad de la información, es menos usado que *Unity* pero de igual forma cuenta con una comunidad masiva. Tiene la ventaja de que *GDScript*, su lenguaje de programación interno, es muy similar a *Python*.

Dos de las simulaciones presentadas aquí (*Camino del Sol* y *Astronomía de Posición*) fueron realizadas en *Godot* y están desplegadas en la página web del proyecto. Aunque hacen uso de las funcionalidades 3D del motor de videojuegos, pueden ser computacionalmente costosas y difíciles de correr en algunos dispositivos. Para simulaciones en 2D se terminó optando por usar *P5*, descrita a continuación.

4.1.4. P5 y JavaScript

P5 (o *p5.js*) es una librería de *JavaScript* que surge a partir de *Processing*, con la intención de combinar la versatilidad de *Processing* con el uso masivo de *JavaScript* en los navegadores web. De esta manera, se abrió la posibilidad de crear programas interactivos en cualquier página y navegador, y compartirlos incluso con dispositivos móviles. Este detalle fue el criterio decisivo para elegir *p5.js* como base para el desarrollo de casi todas las simulaciones presentadas aquí. Así que se convirtieron las realizadas en *Python* a *JavaScript* y se publicaron inicialmente en diversas páginas de hosting gratuito como *OpenProcessing* e *Itch.io*.

JavaScript, aunque es un lenguaje de programación distinto a *Python*, su sintaxis no es muy diferente. Si un programador de *Python* puede acostumbrarse a usar llaves ({}) para declarar funciones o indentar código, finalizar las líneas con punto y coma, y programar en algo que no

sea un Notebook de Jupyter, perfectamente puede acostumbrarse de manera fluida a JavaScript. Adicionalmente, tal como ocurre con Python, existe una variedad inmensa de librerías que pueden utilizarse para potenciar el alcance de los códigos.

4.1.5. WebGL

Otro tema muy interesante del proceso es la posibilidad nativa de P5 de unirse con *WebGL*, otra librería de JavaScript que permite la interacción con la unidad de procesamiento gráfico del dispositivo (GPU) para la ejecución de programas en paralelo. Para entender el poder de esta tecnología, se puede pensar un programa de *WebGL* como una orden que se manda, a través de la GPU, a cada uno de los píxeles de la pantalla al mismo tiempo, en función de su posición e incluso el color de píxeles vecinos. Esta técnica ha sido crucial para el desarrollo de gráficos computarizados en todas las áreas que los aplican. Puede también compararse a la diferencia entre copiar un libro manualmente, o hacerlo usando una imprenta (Gonzalez Vivo & Lowe, 2015)

Un programa de *WebGL* está escrito en un lenguaje similar a C o C++, en bajo nivel para optimizar las órdenes que se le da al entorno gráfico. Cada programa ejecuta una serie de órdenes para retornar al final el color que tendrá el píxel, en función de las variables ingresadas.

Podría pensarse, por ejemplo, en generar un gradiente de intensidad de luz en función de la distancia al puntero del ratón. En ese caso, el programa de *WebGL* pedirá a cada píxel que calcule la distancia entre su vector posición y el vector posición del puntero, y que calcule una exponencial decreciente con esta distancia y retorne un vector de 4 componentes: rojo, verde, azul y transparencia. Podría incluso asignarse un decaimiento distinto a cada color, y replicar la dispersión de Rayleigh, o utilizar una función matemática distinta, e ilustrar la intensidad de un campo gravitacional, etc. En cualquier caso, el programa se encargará de calcular ese valor para todos los píxeles en pantalla de manera simultánea, varias veces por segundo, sin pérdida de eficiencia a la vista, incluso con programas más complejos.

WebGL permitió el desarrollo de la simulación de *Líneas de Absorción*, o los efectos lumínicos de *Evolución Estelar*, pues estos efectos visuales son difíciles de implementar eficientemente en un lenguaje gráfico convencional. Sin embargo, tiene sus desventajas, principalmente que algunos computadores viejos, o en muchos dispositivos móviles, las simulaciones eran lentas o sencillamente no se ejecutaban. Para esos casos hubo que implementar un plan B, que desactiva el *WebGL* y corre gráficos menos sofisticados.

4.1.6. Despliegue con GitHub Pages

Dado que JavaScript es el lenguaje de programación predilecto para desarrollo de páginas web, se diseñó un sitio web propio del proyecto¹⁴, en el que las simulaciones corrían como código fuente de la página. Utilizando *GitHub Pages*, se logró desplegar la página web junto con las simulaciones, logrando así el objetivo técnico del proyecto, lo que facilitó inmensamente compartir los recursos y aplicarlos con estudiantes.

Los pasos para desplegar un sitio web con esta herramienta están descritos en su sitio web¹⁵, y son realmente directos: con crear un repositorio llamado *usuario.github.io*, agregar un archivo

¹⁴ <https://agustinvallejo.github.io/games.html>

¹⁵ <https://pages.github.com/>

HTML, y publicar los cambios, inmediatamente se tendrá disponible el sitio web con esa misma dirección: *usuario.github.io*.

4.2. Arquitectura del Código

Todo el código fuente de las simulaciones puede encontrarse en GitHub¹⁶, y en principio sigue la misma forma de cualquier sitio web. Cada ruta del sitio web está determinada por un archivo HTML, por ejemplo, la página que muestra los botones para acceder a cada una de las simulaciones está programada en el archivo `games.html`, en la carpeta principal del proyecto, por eso su ruta de acceso es `agustinvallejo.github.io/games.html`. De ahí, las distintas subcarpetas llevan a un archivo HTML por cada una de las simulaciones, por ejemplo `games/laboratorio_estelar/main.html`. Donde “games” y “laboratorio_estelar” son carpetas, y `main.html` es el archivo principal.

En terminología de desarrollo web, un archivo HTML tiene cabeza y cuerpo, la cabeza siendo la que contiene los metadatos de la página, y el cuerpo la parte donde está la información a mostrar (título, párrafos, imágenes, etc.). Los cuerpos de las simulaciones estaban relativamente vacíos: tenían el título, en ocasiones algunas preguntas orientadoras, un elemento vacío llamado “game” sobre el cuál se cargaría la simulación posteriormente, y un pequeño código que cargaba la barra de navegación del sitio web. La cabeza del archivo carga la herramienta *Bootstrap*, que facilita la parte del diseño de estilo de un sitio web, permitiendo cambiar las fuentes y tamaños de letras; además, contenía referencias a los códigos desarrollados en JavaScript, que poseían toda la lógica de la simulación.

Así como el `main.html`, que era el esqueleto visual del sitio web, se tenía un `main.js`, que llamaba a las funciones principales de Processing descritas anteriormente. A saber, la función *setup*, que configura todo el lienzo y declara variables iniciales, y la función *draw*, que es la que será llamada varias veces por segundo para actualizar constantemente lo que sucede en el juego. Esta función a su vez ejecuta múltiples funciones secundarias que se encargan de todos los detalles en lógica y presentación. Dependiendo de su complejidad, las funciones secundarias podrían moverse a archivos adicionales de JavaScript, por ejemplo la lógica detrás del centelleo de las estrellas, o el código que se encarga de mostrar los botones y su funcionalidad.

Para las simulaciones que usaban componentes *WebGL*, se tenían además archivos de extensión `.vert`, encargados de definir la geometría de los vértices en pantalla, y archivos `.frag`, que contenían la lógica de los píxeles de la simulación. Nuevamente, esta herramienta permitió crear gráficas más sofisticadas, pues otorga al programador control total sobre el manejo del color y la luz en la pantalla. Además, *Processing* tiene una integración directa con scripts de *WebGL*.

La estructura del código en cada simulación se describe en el capítulo 5.

4.2.1. Contraste con código PhET

De los sitios de simulaciones discutidos en la sección 3.1, PhET fue el principal referente para este proyecto, se estudió cuidadosamente su forma de estructurar el código de una simulación interactiva. De los proyectos descritos, es también el único cuyo código es abierto y está

¹⁶ <https://github.com/AgustinVallejo/AgustinVallejo.github.io>

disponible en GitHub para revisar e incluso replicar¹⁷. Y con la experiencia adicional de trabajar en la creación de *My Solar System*, se pudieron identificar muchas características de la arquitectura de código utilizadas en PhET, muchas de ellas aplicadas a este proyecto, y otras que se pueden pensar como estrategias futuras y consideraciones importantes.

La base del código de PhET es la arquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC), que separa explícitamente los componentes del programa en la lógica de cada uno de estos elementos. La lógica del Modelo es el alma de la simulación, cada objeto tiene información sobre su posición, velocidad, y otras propiedades que pueden ser consideradas relevantes para las ecuaciones. Luego, hay una capa llamada Vista, en donde se crean todos los objetos visuales; el cuerpo de la simulación si se quiere.

En ese sentido, en el Modelo, objetos como pelotas, planetas, imanes, etc. son meramente objetos abstractos con información asociada. En la Vista, se crean nodos para la apariencia visual de la pelota, el planeta, el imán, etc. pero no se maneja ningún tipo de lógica de movimientos o interacciones. El controlador es la parte del programa que se encarga de conectar estos dos, y decirle al nodo visual del planeta que su posición en pantalla estará determinada por el vector posición del planeta del Modelo.

Las simulaciones de este trabajo no usan la arquitectura MVC, y objetos como las estrellas tienen adentro toda la información de evolución y visualización. En ese sentido, en temas de escalabilidad, la falta de una estructura definida podría significar un problema, si se desea continuar con el proyecto.

Otro elemento clave para el buen funcionamiento de las simulaciones PhET es el uso de módulos y librerías propias. Es decir, existen núcleos lógicos que controlan las características compartidas más importantes de todas las simulaciones, y en repositorios independientes se manejan por separado temas como: botones, sonido, figuras geométricas, ilustraciones, y el mismo motor de visualización. Para las simulaciones de este trabajo, cada simulación tiene su propio archivo de botones, y no hay un código común del cuál se puede partir, o librerías que manejen el funcionamiento de las distintas simulaciones. También es un tema que podría pensarse a futuro.

La documentación de PhET es muy completa, y facilita la entrada de desarrolladores interesados en el proyecto. También puede hallarse en GitHub. Los patrones aquí mencionados son algunos relevantes de la lista de patrones de diseño de código con los que cuenta PhET¹⁸.

¹⁷ <https://github.com/phetsims>

¹⁸ <https://github.com/phetsims/phet-info/blob/master/doc/phet-software-design-patterns.md>

5. Simulaciones Astrofísicas desarrolladas

A continuación, se presenta una descripción breve de cada una de las simulaciones realizadas, qué conceptos se buscan enseñar, qué modelos matemáticos fueron utilizados, y las preguntas movilizadoras que acompañan la secuencia didáctica en caso de aplicar las simulaciones en el aula. Algunas de las simulaciones fueron probadas con los estudiantes del Semillero de Astronomía de la Universidad de Antioquia semestre 2022-1, y se adjuntan algunos comentarios, percepciones u observaciones que realizaron.

5.1. Evolución Estelar

5.1.1. Modelo Teórico

Se parte de la concepción astrofísica de que las estrellas se crean a partir del colapso de una nube molecular. A partir de este colapso, cada estrella tendrá una masa inicial, dependiendo de las condiciones iniciales de la nube; las estrellas de baja masa serán más abundantes que las de gran masa (Salpeter 1955). Entendiendo que las estrellas logran una estabilidad llevando a cabo procesos de fusión nuclear en su interior, las más masivas tendrán que “quemar combustible” más rápidamente, lo cual causa que tengan temperaturas más altas, tengan un color superficial más intenso en el azul, y que duren mucho menos tiempo. En comparación, las estrellas más livianas son más frías, tendrán colores rojizos y podrán durar más en sus procesos de fusión nuclear. En particular, estrellas muy calientes pueden durar tan unos cuantos millones de años, mientras que las estrellas más frías abarcan cientos de miles de millones de años (Sepúlveda-Soto, 2014). El Sol es una estrella mediana, de tipo enana amarilla, y tiene un tiempo de vida estimado de unos diez mil millones de años.

Lo que ocurre al final de una estrella también está determinado por su masa inicial. Las estrellas pequeñas se extinguirán, enviarán sus capas al espacio, y su núcleo expuesto se seguirá enfriando lentamente, con el nombre de Enana Blanca. Ese será el mismo final de nuestro Sol. Para las estrellas más masivas que 4 masas solares, cuando el núcleo no logra producir más energía, las capas exteriores colapsan por la fuerza gravitacional de la misma estrella y ésta explota como una supernova. Dependiendo del tamaño inicial, si el núcleo de la estrella es menor a 3 masas solares, quedará una estrella de neutrones; si su masa es mayor, el resultado será un agujero negro (Sepúlveda-Soto, 2014).

La idea de “nacimiento” y “muerte” estelar, en el contexto de la astrofísica, corresponde a términos de la vida cotidiana aplicados a estos cuerpos. Hablamos de que una estrella muere cuando deja de producir fusión nuclear en su interior y se convierte en un objeto distinto.

5.1.2. Experiencia de Usuario

Esta simulación crea estrellas de diversas masas a partir de una nube molecular. La escala temporal hace que se puedan observar los procesos de evolución de cada una de las estrellas creadas, motivando al estudiante a identificar diferencias entre la evolución de pequeñas, medianas (como el Sol) y grandes, reconociendo a través de la observación los diversos estadios evolutivos y sus desenlaces.

Dado que esta fue la simulación elegida para llevar a cabo la prueba pedagógica, se hará una descripción completa en el capítulo 6 tanto de su lógica interna, como del proceso de diseño y rediseño de la simulación, la aplicación de los conceptos y objetivos de aprendizaje.



Figura 7. Simulación de Evolución Estelar.

5.1.3. Arquitectura del Software

Se describe a continuación la estructura interna que logró el funcionamiento de esta simulación, todos los archivos están en la ruta `games/laboratorio_estelar/`:

- `main.html`: Carga el contenido visual de la página.
- `main.js`: Carga el programa principal, inicializando las variables y los *Shaders*, además controla que se itere la simulación en cada frame.
- `stars.js`: Se define toda la lógica interna de un objeto Estrella y también del conjunto de todas las estrellas. Se puede ver a profundidad en la sección 6.1.
- `graph.js`: Controlaba el funcionamiento del diagrama HR, que después se descartó para la intervención didáctica.



Figura 8. Diagrama HR dibujado con los datos de la simulación.

- `buttons.js`: Almacena toda la lógica de los botones laterales.
- `timeButtons.js`: La lógica de los botones centrales, encargados de controlar el tiempo de la simulación.
- `cloudShader.js`: Contiene el *Shader* de *WebGL* que renderizaba la imagen de la nube al fondo de la simulación.
- `shaders.js`: Contiene la lógica gráfica que permite que las estrellas brillen, también es un *Shader* de *WebGL*.

5.2. Órbitas Planetarias

5.2.1. Modelo Teórico

De acuerdo con la mecánica clásica, en sistemas gravitacionales de dos cuerpos, cuando la masa de uno domina sobre la del otro (como ocurre con el Sol y los planetas, donde el Sol es el más masivo), las trayectorias que seguirá el cuerpo menor serán cónicas: círculos, elipses, parábolas o hipérbolas. Dependiendo de la posición y velocidad del cuerpo en cuestión, los parámetros orbitales pueden calcularse usando las ecuaciones descritas en (Tatum, 2022). En particular, se halló el semieje mayor de la órbita a partir de los vectores posición y velocidad, luego la excentricidad y el argumento del periapsis. Para evolucionar la posición del cuerpo, hay que resolver la ecuación de velocidad angular de Kepler.

5.2.2. Experiencia de Usuario

El estudiante podrá crear planetas en cualquier punto de la pantalla con ciertas posiciones y velocidades iniciales. El sistema mostrará la órbita respectiva para el cuerpo. Experimentando con la simulación, el estudiante podrá observar algunas de las órbitas posibles alrededor del Sol, así como relaciones entre el tipo de órbita, la magnitud o velocidad del cuerpo en órbita, el periodo de esta, etc.

Por el alcance de la simulación, las órbitas con velocidad de escape aparecen como trayectorias rojas y no son permitidas. Sin embargo, esto también permite hablar de procesos de escape gravitacional.

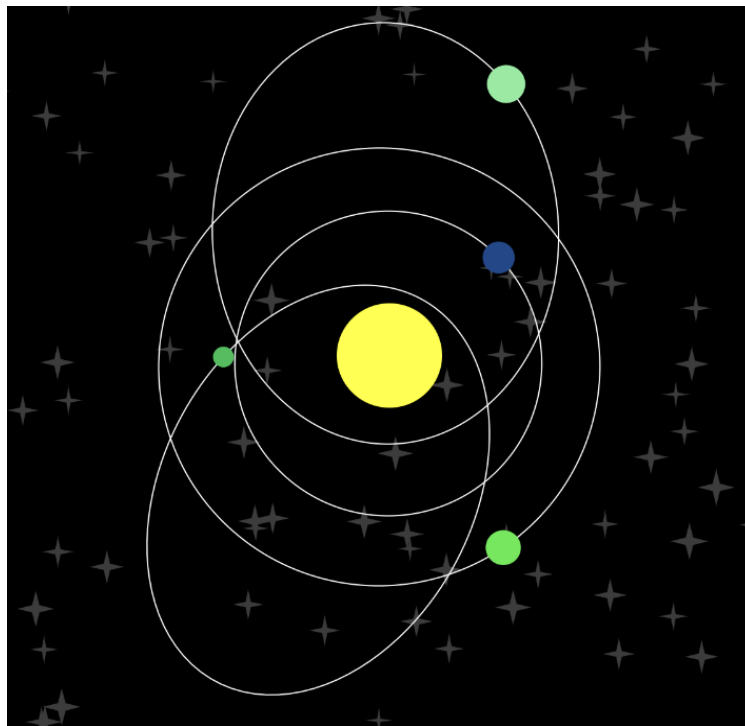


Figura 9. Simulación de Órbitas Planetarias

Retos propuestos:

- Crea un sistema solar con varias órbitas circulares.
- Reconoce cuál es “el truco” para que una órbita sea perfectamente circular ¿Cuáles son las variables que más afectan?
- ¿Qué determina que una órbita sea prohibida (roja) o no? ¿Qué crees que signifiquen este tipo de órbitas?

- Crea dos órbitas circulares y dibuja una órbita elíptica que esté perfectamente contenida entre las dos.

5.2.3. Arquitectura del Software

Esta simulación tiene un funcionamiento similar a la arquitectura Modelo-Vista-Controlador descrita al final del capítulo 4. Hay elementos que controlan la lógica y las ecuaciones físicas (modelo), y otros que determinan cómo se ven los cuerpos (vista). todos los archivos están en la ruta `games/planets/`:

- `sandbox.html`: Es el “main.html”, controla el esqueleto del sitio web en general.
- `main.js`: Es el controlador, carga las variables iniciales del programa y controla la interacción con el mouse, es decir, todas las funciones que determinan que al hacer clic y arrastrar, se crea un nuevo planeta con cierta velocidad. Además almacena todos los planetas creados.
- `planet.js`: Tiene la lógica visual del planeta, determina cómo se dibuja, y manda órdenes para calcular sus parámetros orbitales y sus posiciones futuras.
- `physics.js`: Coordina todas las ecuaciones de mecánica orbital descritas en 5.2.1 y dibuja las órbitas elípticas.
- `backgroundStars.js`: Genera el arreglo de las cientos de estrellas que se ven tenues al fondo de la simulación.

5.3. Líneas de Absorción

5.3.1. Modelo Teórico

De acuerdo a las interacciones entre partículas fundamentales, cuando un electrón está atado potencialmente a una molécula, solo puede existir en ciertos niveles. A este fenómeno se le conoce como cuantización de la energía, y su descubrimiento dio origen a la física cuántica. Que el electrón solo pueda estar en contados niveles de energía implica que, al interactuar con fotones, solo absorbe los de cierta longitud de onda (color), generando una especie de sombra que puede detectarse al analizar el espectro de luz que atraviesa un gas: midiendo la intensidad de cada longitud de onda, hay unos valles donde la luz es en gran parte absorbida. Estos valles son conocidos como “líneas de absorción”, que inversamente, cuando esa luz es reemitida, se puede detectar como “líneas de emisión”. La longitud de onda de estas líneas es característica de cada elemento o molécula, y nos permite diferenciar los espectros recibidos por gases o atmósferas estelares (Sepúlveda-Soto, 2014).

El gas que interactúa con la luz además tendrá cierta temperatura, asociada al movimiento natural de las moléculas que lo componen. Debido a ese movimiento, el efecto Doppler hará que la luz absorbida tenga un ligero corrimiento si la molécula se acerca o se aleja del detector. Este efecto se mide como un ensanchamiento de las líneas de absorción.

5.3.2. Experiencia de Usuario

En esta simulación se puede hacer interactuar un par de gases con luz de diversas longitudes de onda. Para mostrar mejor los conceptos de espectroscopía, se muestra como cada gas absorbe cierto color específico, haciendo que las partículas se exciten si el usuario lo ilumina con la longitud de onda necesaria. Alternativamente, se puede iluminar con luz blanca de todas las longitudes de onda, en cuyo caso, se observará el espectro continuo con las líneas de absorción de cada gas. También pueden verse las líneas de emisión si se apaga la luz incidente y se deja que solo el gas excitado ilumine el detector.

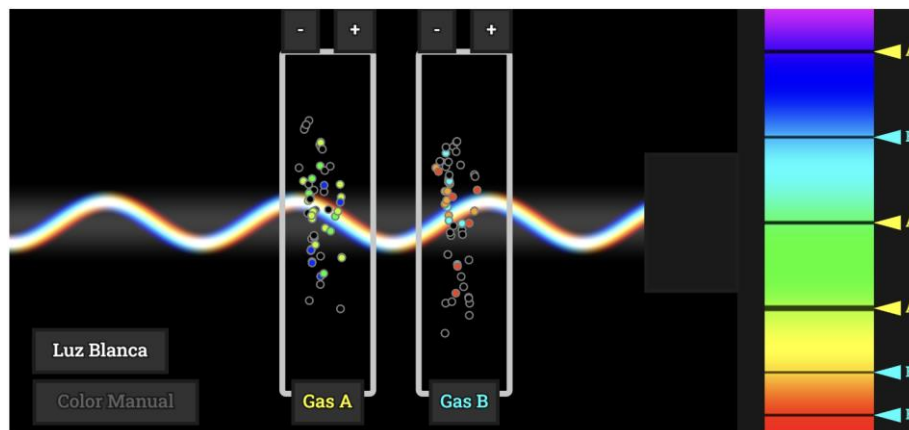


Figura 10. Simulación de Líneas de Absorción en la configuración de Luz Blanca, se ven las líneas a la derecha y las moléculas en el centro.

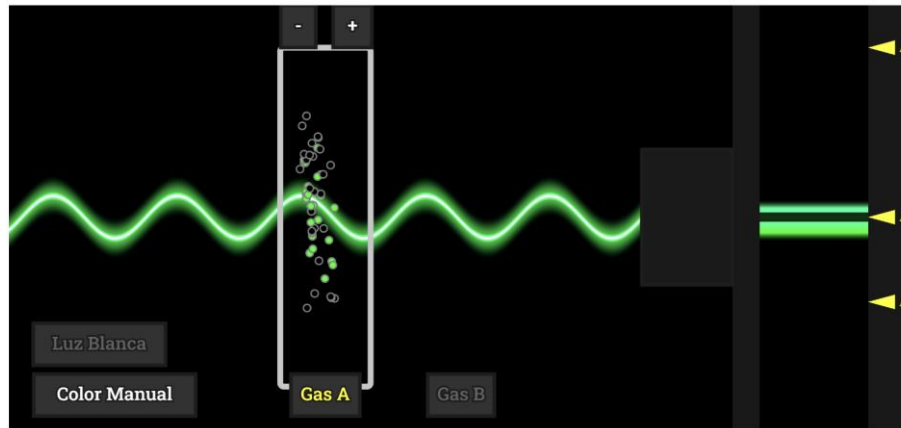


Figura 11. Simulación de Líneas de Absorción en la configuración de luz monocromática.

Para el caso de esta simulación, si bien no se realizó todo un proceso de diseño pedagógico (como sí se describe en Evolución Estelar), se plantearon algunas preguntas orientadoras, buscando centrar conversaciones de aula alrededor de algunos conceptos asociados a las líneas de absorción y emisión (ver tabla 1). Estas preguntas fueron trabajadas con un grupo de 10 estudiantes de primer semestre del Pregrado de Astronomía de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), con la clase Fundamentos de Astronomía en el semestre 2021-2. Dado que la clase se dictó de manera virtual, cada estudiante interactuó con la simulación, y sus respuestas eran recolectadas a través del formulario web Menti, que permitía visualizar una nube de respuestas para que así el maestro pudiera guiar la discusión.

| Pregunta | Concepto | Algunas Respuestas | Observaciones |
|--|---------------------------------------|--|---|
| ¿Cómo cambia el tamaño de la onda según el color? | Longitud de onda | Distancia, tamaño, lambda, longitud, periodo. | |
| ¿Hay colores más rápidos que otros? | Frecuencia y velocidad | Sí: 7 No: 5 | Si bien la mayoría de las respuestas fueron incorrectas, fue una buena oportunidad para abordar y corregir una noción errónea en el aula. |
| ¿Qué significa la barra de colores que aparece a la derecha? | Espectro continuo | Composición de la luz, espectro, colores que se crean, descomposición de la luz, energía, refracción, calor. | Aunque había algunas observaciones correctas, otras mostraban la necesidad de orientación al concepto buscado. |
| ¿Qué puedes observar acerca de la | Espectro continuo y luz monocromática | La luz blanca está compuesta de | |

| | | | |
|---|--|--|---------------------------|
| luz blanca, diferente de la luz de cierto color? | | diversos colores, la luz blanca es más grande, la longitud de onda es mayor que la de los colores. | |
| ¿De qué manera interactúa cada gas con la luz blanca? ¿Y con la luz de color? | Líneas de absorción a ciertas longitudes de onda | Las partículas absorben algunos colores, la luz pierde la energía, líneas de absorción, absorción de la luz. | |
| ¿Qué relación tiene el color de las moléculas y las líneas de la derecha? | Líneas de absorción a ciertas longitudes de onda | Son puntos muertos, nos dan las huellas digitales del gas, son una representación de las moléculas atrapadas en el gas, grado de absorción por parte de las moléculas. | |
| ¿Qué pasa si apagas la luz una vez las moléculas del gas están encendidas? | Líneas de emisión | Se observan las líneas de emisión, las moléculas siguen emitiendo luz, los gases conservan la luz absorbida y se distribuye hasta agotarse. | |
| ¿Qué pasa con las líneas de absorción/emisión al cambiar la abundancia del gas? | Ancho de líneas | | No se abordó en la clase. |

Tabla 1 Respuestas recolectadas en la clase de Fundamentos de Astronomía en el semestre 2021-2, usando la herramienta Menti.

5.3.3. Arquitectura del Software

Los archivos que controlaban la simulación se organizan como sigue. Todos los archivos están en la ruta `games/physics/spectrum/`:

- `index.html`: Carga el sitio web y las preguntas orientadoras.
- `sketch.js`: Carga las variables principales de la simulación y controla datos como el tipo de luz que se está emitiendo, cuántas partículas tiene cada contenedor, dónde está el puntero, etc.
- `buttons.js`: La lógica de los botones.

- **gas.js**: Contiene la clase *GasMolecule*, a la cuál pertenecen todos los objetos *Molécula*, que determina el funcionamiento de una sola molécula, si se encuentra excitada, su forma de moverse, y su forma de mostrarse en pantalla. También la clase *GasTube*, que coordina el funcionamiento de un mismo tipo de gas, su posición en pantalla y las longitudes de onda que recibe.
- **shader.vert**: El *Vector Shader* de *WebGL* que define las dimensiones de la pantalla.
- **shader.frag**: El *Fragment Shader* de *WebGL*, que controla cómo se visualiza la onda lumínica en la pantalla (una superposición de ondas sinusoidales de varias intensidades para que parezca brillar), así como el espectro continuo que se muestra. El ancho de la línea está determinado por la cantidad de moléculas presentes en cada gas.

5.4. Sistema Tierra – Luna

5.4.1. Modelo Teórico

La Luna es el satélite natural que orbita nuestro planeta Tierra. Completa una órbita completa, respecto a las estrellas, en 27.32 días (Sepúlveda-Soto, 2014). Debido a que el Sol ilumina sólo la mitad de la Luna, la posición relativa del Sol, la Luna y la Tierra, determinará la proporción de superficie iluminada que observaremos desde el planeta, y a su vez, esta proporción determinará la fase lunar. Cuando la vemos completamente iluminada, se trata de una Luna Llena, y ocurre en una alineación aproximada Sol-Tierra-Luna; cuando la parte iluminada no se nos muestra, se trata de una Luna Nueva, y ocurre cuando la configuración es Sol-Luna-Tierra. Las fases de Luna Creciente y Luna Menguante ocurren cuando estos tres cuerpos forman ángulos de 90° en el cielo. Siendo el orden de las fases: Nueva, Creciente, Llena y Menguante. Como la Tierra también orbita alrededor del sol, el tiempo para que la misma fase se repita es mayor al periodo orbital lunar, y corresponde a 29.53 días.

Debido a la inclinación de la órbita lunar, de unos 5° , no siempre ocurren eclipses cuando se alinean el Sol, la Tierra y la Luna, sino que esta última debe estar ubicada sobre el plano orbital de nuestro planeta.

Por su parte, las mareas se deben a un efecto diferencial de la fuerza gravitatoria que experimenta cada punto de la Tierra debido a la Luna o al Sol. La aceleración gravitacional newtoniana disminuye con el cuadrado de la distancia, luego, en la superficie del planeta los lugares más cercanos a la Luna sentirán una atracción ligeramente mayor a los lugares más alejados. Este efecto es imperceptible a pequeñas escalas, pero los océanos (y la atmósfera) experimentan una deformación gravitacional por las mareas, que mientras la Tierra gira, puede percibirse como una subida y bajada diaria del nivel del mar. Este efecto se incrementa cuando el efecto de mareas lunar se combina con el solar, es decir, en las fases Nueva y Llena.

Respecto al tamaño del sistema Tierra-Luna, generalmente es dibujado como dos círculos cercanos entre sí. Sin embargo, la distancia de la Tierra a la Luna es aproximadamente de 60 radios terrestres. Y la Luna tiene un radio de 0.27 veces el terrestre.

5.4.2. Experiencia de Usuario

En un modelo no a escala, el estudiante podrá interactuar con la Luna y su movimiento alrededor de la Tierra. Algunos botones de la simulación activarán información adicional referente a fenómenos que tienen que ver con la Luna. Esta experiencia busca que el estudiante reconozca cómo la posición relativa de la Luna-Tierra-Sol determina las fases, las mareas y los eclipses, con un botón adicional que muestra el sistema en su escala real.



Figura 12. Simulación de Sistema Tierra-Luna en su pantalla inicial.

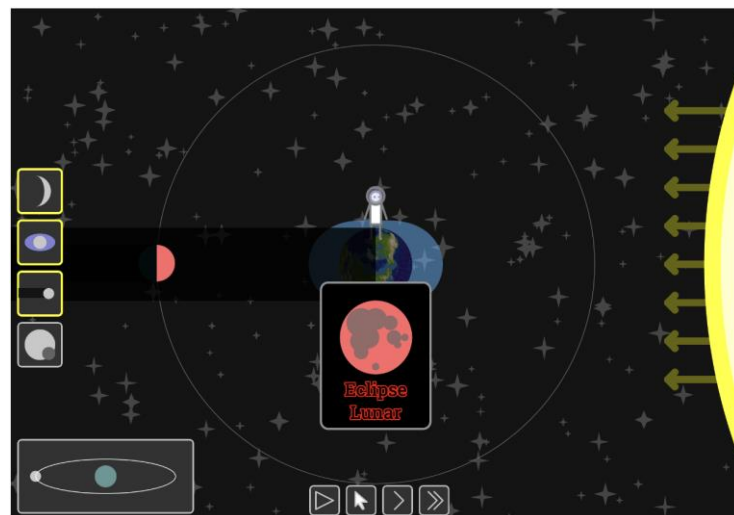


Figura 13. Simulación de Sistema Tierra-Luna activando las fases (que muestra la luna llena eclipsada), las mareas y las sombras.

El grupo de prueba sugirió etiquetas de los botones, las cuales fueron implementadas en esta y las demás simulaciones, para tener mayor claridad sobre los controles. Comentaron que la funcionalidad de escalas, que muestra el sistema en su escala real, fue confusa, y no lo entendieron. Posiblemente se necesite mayor acompañamiento con esta parte de la simulación.

5.4.3. Arquitectura del Software

La simulación de la órbita lunar es de las que más componentes tiene, lo cuál facilitó mucho más su desarrollo y orden. Todos los archivos están en la ruta `games/moon/`:

- `main.html`: La estructura de la página web.
- `main.js`: Carga la simulación e inicializa todos los elementos visuales: Sol, luna, astronauta.
- `all.js`: Controla cuáles de los botones están activos.
- `buttons.js`: Controla la lógica de los botones.
- `phases.js`: Controla el cuadro de las fases lunares.

- `polar.png`: La imagen de la tierra.
- `scales.js`: La lógica que lleva el sistema a su configuración de escala real.
- `shadows.js`: Dibuja las sombras de la tierra y la luna. Para los eclipses solares, proyecta la sombra lunar sobre la superficie del planeta.
- `stars.js`: Las estrellas de fondo.
- `tides.js`: La geometría de las mareas, generada con una figura polar cuyo radio era una composición de funciones coseno.

5.5. Monturas de Telescopios

5.5.1. Modelo Teórico

Para estudiar la astronomía de posición, es necesario hablar de sistemas de coordenadas. Estos sirven para ubicar objetos en el cielo, y llevar a cabo observaciones precisas. En particular, conviene hablar de los sistemas de coordenadas altacimutal y ecuatorial. Uno centrado en el observador terrestre, el otro, absoluto respecto a las constelaciones.

Las coordenadas altacimutales, también conocidas como coordenadas horizontales, están justamente basadas en el horizonte celeste. Este permite ubicar objetos en el cielo de un observador utilizando dos datos: *acimut* y altura. El *acimut* es el ángulo medido entre el punto cardinal Norte y la vertical de un astro, en dirección Norte-Este-Sur-Oriente (NESO). La altura es el ángulo entre el horizonte y el objeto en cuestión. Además, este sistema coordenado es en el que se basan las monturas altacimutales de telescopios, permitiendo que el observador apunte hacia los lados y hacia arriba. Sin embargo, con este tipo de monturas, hacer seguimientos manuales del cielo no es ideal.

Las coordenadas ecuatoriales, por otro lado, se alinean con el ecuador celeste, y no dependen de la ubicación geográfica de un observador. La posición de un cuerpo en este sistema está determinada por la declinación, el ángulo entre el astro y el ecuador; y la ascensión recta, el ángulo entre el meridiano del objeto y el meridiano del punto del equinoccio de primavera. Las monturas ecuatoriales de telescopios se ubican con este sistema, lo cuál permite que hagan seguimiento continuo del movimiento del cielo.

5.5.2. Experiencia de Usuario

Esta simulación muestra el movimiento de los cielos en dirección norte, según la latitud elegida por el usuario. Las estrellas se moverán en torno al Polo Norte Celeste. Usando las flechas del teclado, el usuario podrá controlar la ubicación de la mira de dos telescopios con distintas monturas: Una opción es utilizar la montura altacimutal para obtener movimientos paralelos y perpendiculares al horizonte, y otra es usar la montura ecuatorial para mover el telescopio alineado con los movimientos del cielo.

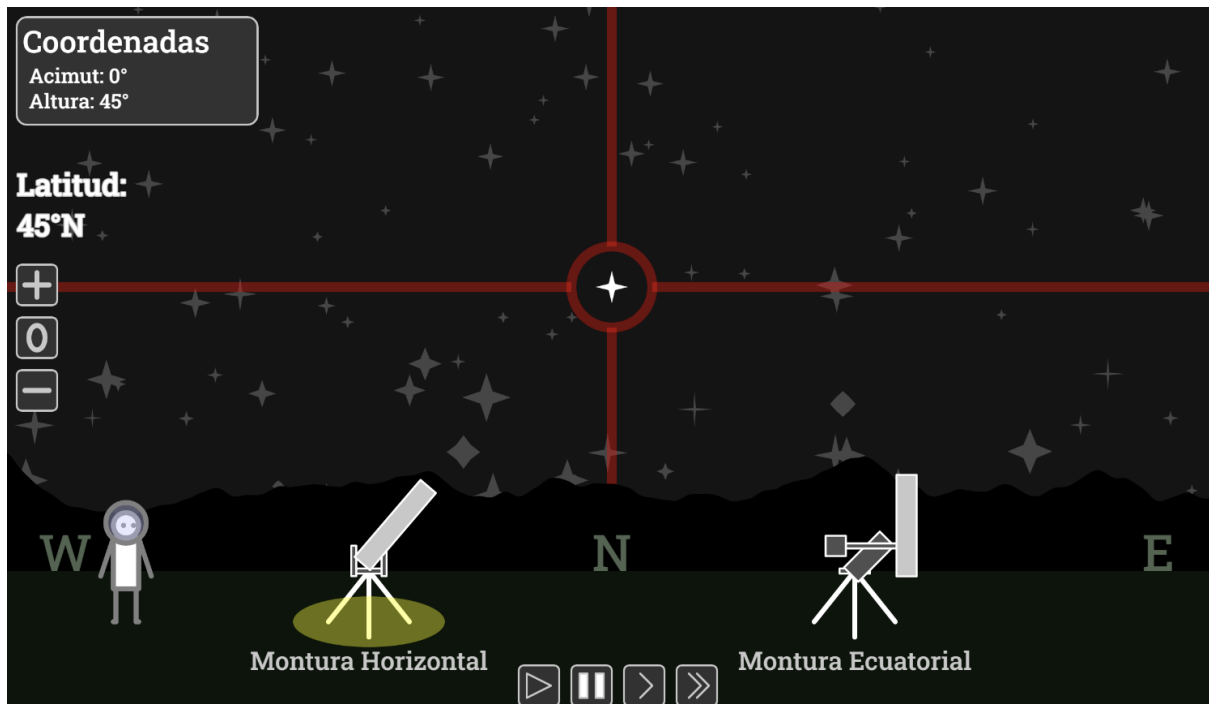


Figura 14. Simulación de Monturas de Telescopios en la configuración de montura horizontal, mostrando las coordenadas altacimutales.

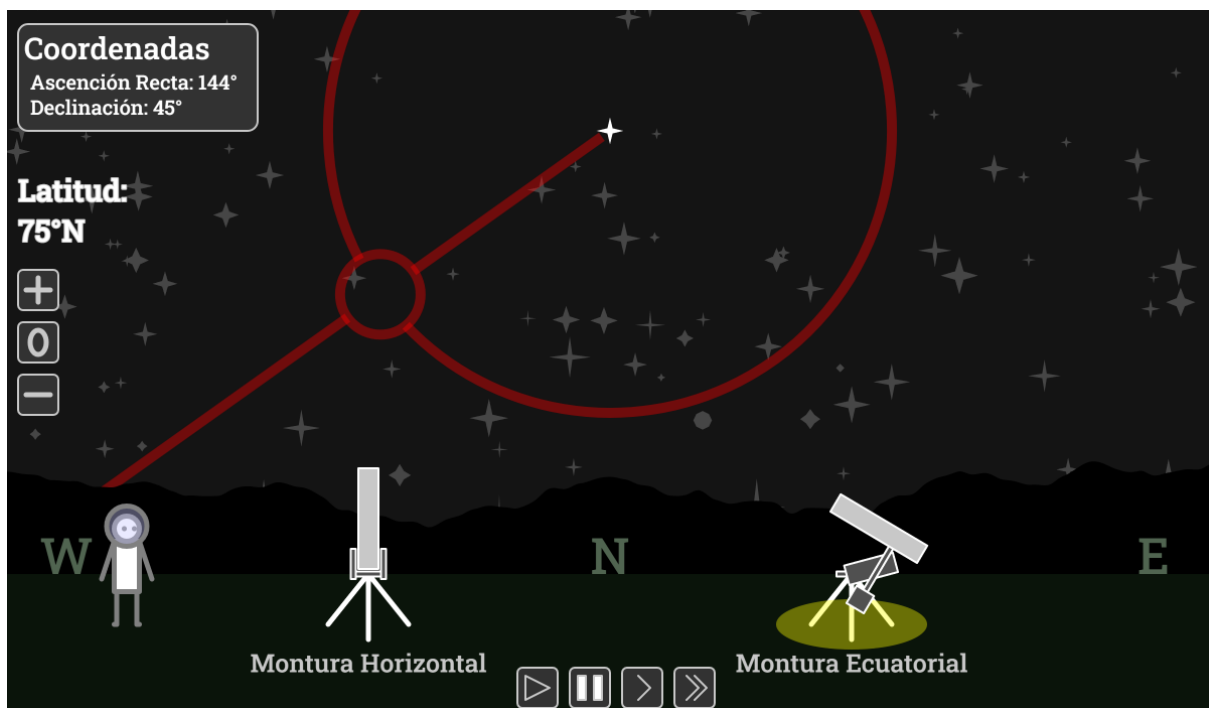


Figura 15. Simulación de Monturas de Telescopios bajo la configuración de Montura Ecuatorial, con coordenadas ecuatoriales saliendo del Polo Norte Celeste.

Preguntas orientadoras:

- ¿En qué dirección se mueve el cielo?
- ¿Cómo cambia el movimiento del cielo a distintas latitudes?
- ¿En qué se diferencian las dos monturas? ¿Con alguna es más fácil seguir las estrellas?
- ¿Qué crees que es la estrella blanca?
- ¿Todas las estrellas titilan por igual? ¿Qué las diferencia?

- ¿Cómo describirías las coordenadas de cada montura?

Con el grupo de prueba, uno de los estudiantes no solo dio respuesta a todas las preguntas sino que también se motivó a investigar más sobre coordenadas celestes y telescopios (ver Anexos). Otra, por su parte, menciona que como no había tenido un acercamiento previo a palabras como “acimut” o “ascensión recta” era más difícil de responder, pero esto también motivó investigaciones propias; pero, cómo realizó la actividad sola, no tenía cómo saber si sus respuestas eran correctas. En general sugieren agregar más definiciones de los conceptos en la misma simulación, y comentan que es más didáctica que solo leer.

5.5.3. Arquitectura del Software

Todos los archivos están en la ruta **games/observation/**:

- **main.html**: El esqueleto de la página web y las preguntas orientadoras.
- **main.js**: Carga la simulación y dibuja el entorno.
- **all.js**: Llama a todas las funciones pertinentes al momento de dibujar. Funciona como el controlador.
- **buttons.js**: La misma lógica de los botones descrita en las simulaciones previas.
- **stars.js**: Dibuja las estrellas de fondo, pero además determina la cantidad de centelleo en función de su distancia al horizonte, y coordina la rotación del cielo estrellado alrededor de polaris según la latitud.
- **telescopes.js**: Dibuja la línea de control de los telescopios, que se puedan mover con las flechas, y la forma como el tubo óptico apunta al cielo.

5.6. Movimientos del Sol

5.6.1. Modelo Teórico

Debido a la inclinación del eje rotacional terrestre, el Sol no siempre ilumina a nuestro planeta desde el frente, sino que, dependiendo de la época del año, la dirección de la luz solar puede estar más hacia el norte de la tierra o más hacia el sur, lo cuál a su vez causa que la trayectoria del Sol en el cielo de un observador se vea alterada. Dependiendo de la ubicación geográfica desde la que se observe, esta alteración puede ser nula (en el ecuador la noche y el día duran esencialmente lo mismo) o extrema (en los polos la noche puede llegar a durar seis meses). Las estaciones son principalmente causadas por este fenómeno.

A lo largo del año, el Sol oscila entre norte y sur. Se conocen como Solsticios a los días en los que el Sol está en su punto más alejado del ecuador celeste (la línea divisoria entre hemisferios), sea 23° al norte o 23° al sur. Y Equinoccios son los días donde el Sol se encuentra justo entre ambos hemisferios. Debido a este movimiento aparente del Sol, la longitud de las sombras cambiará durante todo el año, permitiendo hacer mediciones de fechas y hasta calendarios, como lo hicieron muchas culturas antiguas.

5.6.2. Experiencia de Usuario

Se tiene un gnomon centrado en pantalla, alrededor de este está el círculo de movimiento diurno del Sol, que ilumina la columna y proyecta una sombra. Hay tres barras de deslizamiento con las que el usuario puede interactuar: Hora del día, fecha del año y latitud. El objetivo es que el usuario pueda experimentar con las distintas configuraciones para notar la posición aparente del Sol a lo largo del año en distintas latitudes.

Si bien no se diseñó una secuencia didáctica extensa como en *Evolución Estelar*, hay dos actividades disponibles con esta simulación: La primera, realizada para aplicar con el Semillero de Astronomía, se describe más adelante; la segunda, fue realizada de manera autónoma por Jaime Álvarez, un maestro que vio un adelanto del proyecto en el evento latinoamericano Aula Bajo Las Estrellas, esta secuencia puede verse en el Apéndice E.

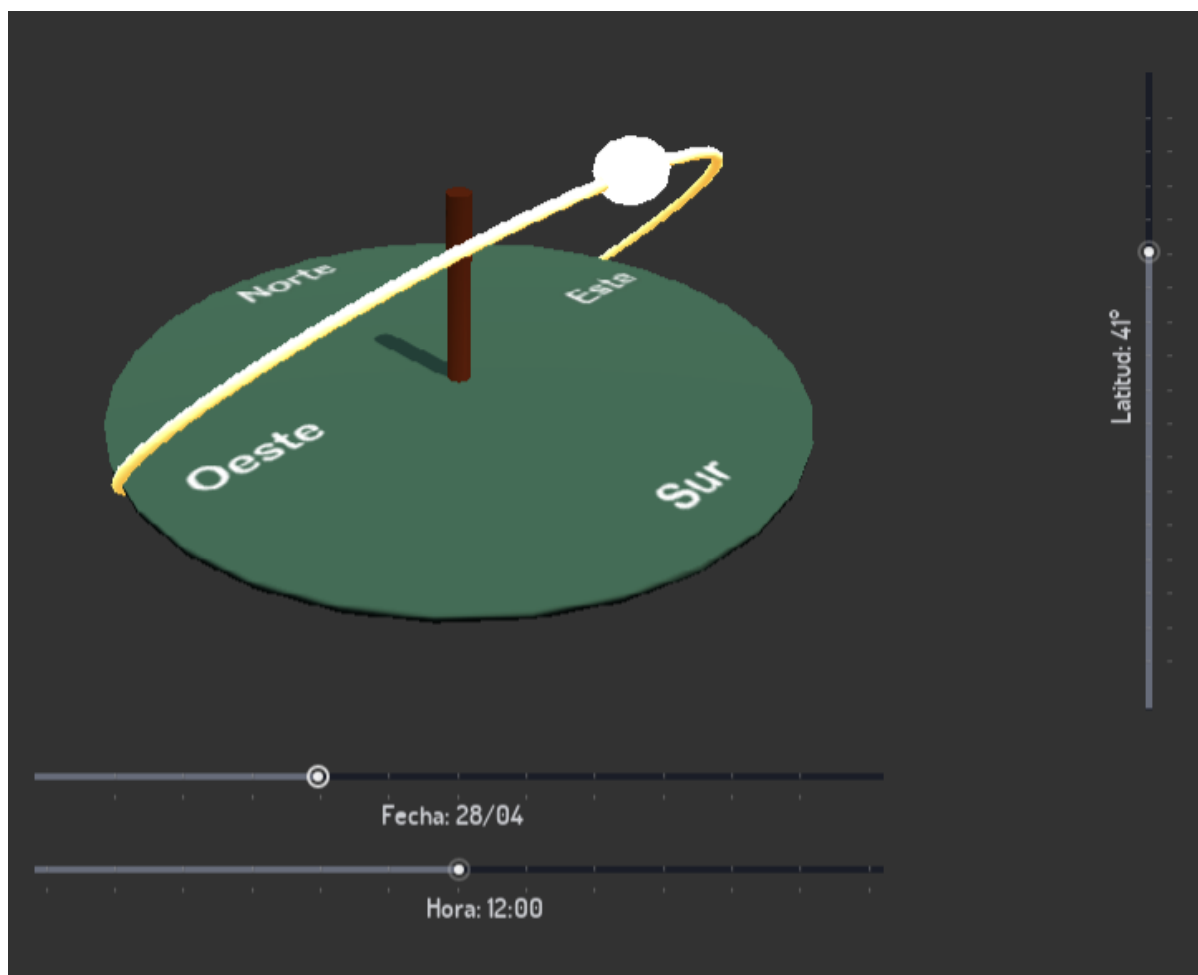


Figura 16. Simulación de Movimientos del Sol. Notar la sombra del poste, que irá cambiando según la ubicación del Sol.

Actividad 1

Elige algunas de las fechas y lugares, configura la simulación con esos datos, y responde:

| Fechas | Lugares | Preguntas |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Hoy - 22 septiembre - 21 diciembre - 22 de junio - Tu fecha favorita | <ul style="list-style-type: none"> - Medellín (6°N) - El Ecuador (0°) - Madrid (40°N) - Santiago de Chile (31°S) - Múrmansk (68°N) - Polo Sur (90°S) | <ul style="list-style-type: none"> - ¿Al mediodía el Sol está sobre el gnomon (el poste)? - ¿El Sol sale y se oculta por el Este y Oeste respectivamente? - ¿Cuánto tiempo dura el día? ¿Cuánto dura la noche? - Busca la fecha de máxima duración del día. - Busca la fecha en la que el Sol esté sobre el poste. |

Tabla 2 Actividades propuestas para simulación de Movimientos del Sol

5.6.3. Arquitectura del Software

Como esta fue una de las simulaciones creadas en *Godot*, la lógica interna es exportada desde el motor de videojuegos a un archivo *JavaScript* y uno *HTML*, para que el navegador lo pueda ejecutar. Sin embargo, este archivo a ojos humanos no dice nada, y no tiene mucho sentido describirlo.

Para la creación de esta simulación, los diferentes modelos se diseñaron en *Blender* y se llevaron al motor de videojuegos. Luego, se ponen los *sliders* que controlan la fecha, hora y latitud, y a través del código interno determinan la posición del Sol cambiando los ángulos de rotación.

Desafortunadamente, el archivo de Godot original se perdió en un cambio de equipos, y solo queda el indescifrable archivo exportado, imposibilitando modificaciones adicionales a esta simulación sin reconstruirla desde cero. Todos los archivos están en la ruta `games/analema/`.

5.7. Esfera Celeste

5.7.1. Modelo Teórico

Debido a la inclinación del eje de la Tierra respecto a su plano orbital, a lo largo del año el Sol parece desplazarse entre las constelaciones del cielo. La línea que describe su recorrido se conoce como eclíptica, y las constelaciones que se encuentran a lo largo de este camino se conocen como las constelaciones del zodiaco. Uno de los principales objetivos de la astronomía de posición es lograr reconocer las líneas del ecuador celeste y la eclíptica, así como la posición aparente para observadores en distintas latitudes.

5.7.2. Experiencia de Usuario

Este modelo en tres dimensiones muestra a la Tierra dentro de una bóveda celeste, denotando la ubicación del ecuador celeste (azul), la eclíptica (naranja), y el Sol en algún punto de esta; sobre la tierra hay un observador en una latitud ecuatorial. A la derecha de esta representación, se encuentra la esfera local del observador, en donde el mismo personaje está acostado sobre su plano horizontal, y observa las distintas posiciones de los astros y las esferas. El objetivo es lograr una asociación entre las posiciones en la tierra respecto a la bóveda celeste y los movimientos naturales del cielo.

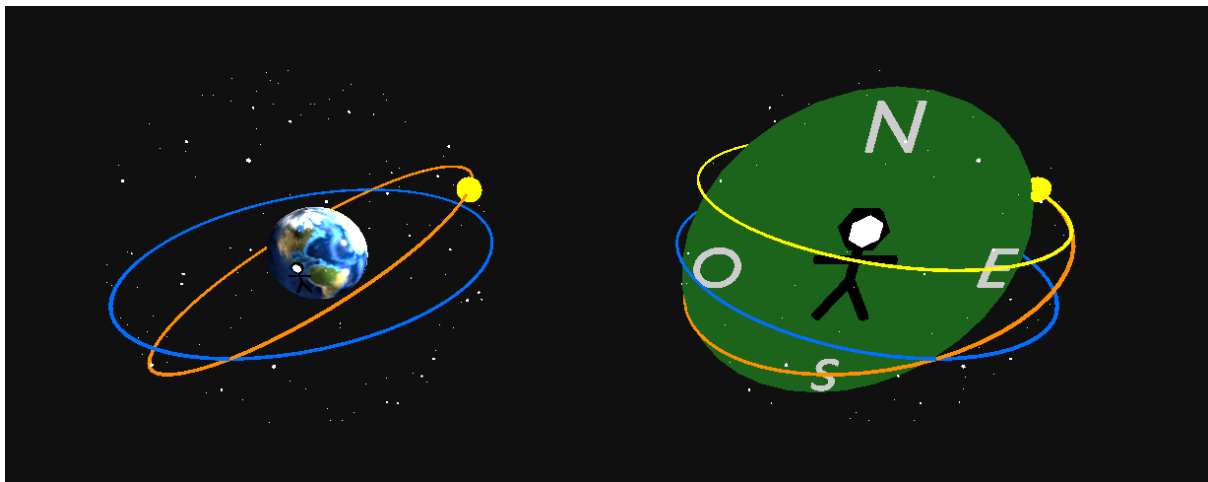


Figura 17. Simulación de Esfera Celeste, mostrando lado a lado las dos vistas relevantes para la astronomía de posición.

5.7.3. Arquitectura del Software

Similar a la simulación anterior, todos los objetos se diseñaron en *Blender*, y en el motor de videojuegos solo se controlan las rotaciones relativas a través del teclado. Los archivos originales de esta simulación también se perdieron, y habría que recrearla desde cero para llevar a cabo cualquier cambio. Todos los archivos están en la ruta `games/astroposition/BovedaCeleste`.

5.8. Centelleo Estelar

5.8.1. Modelo Teórico

Cuando un rayo de luz atraviesa la atmósfera, su camino se ve perturbado por interacciones con las moléculas del aire. Como resultado, se genera un efecto visual conocido como turbulencia atmosférica, que altera y distorsiona la imagen de un astro. En el caso de las estrellas, este efecto se percibe como el famoso “centelleo” o “titileo”, en el que su luz oscila de manera aleatoria, pareciendo aumentar y disminuir en intervalos cortos de tiempo. Según la cantidad de aire que tenga que atravesar la luz, este efecto será mayor o menor. Por eso, el centelleo cercano al horizonte es más intenso que sobre nuestras cabezas.

5.8.2. Experiencia de Usuario

Con el objetivo de mostrar la geometría del “seeing” atmosférico, se puede posicionar una estrella en distintas posiciones del cielo y observar el camino recorrido por su luz hasta alcanzar un observador en la tierra. Se busca demostrar que la luz que llega directamente desde arriba (el cenit) recorre menos camino que la luz que viene de otras direcciones.

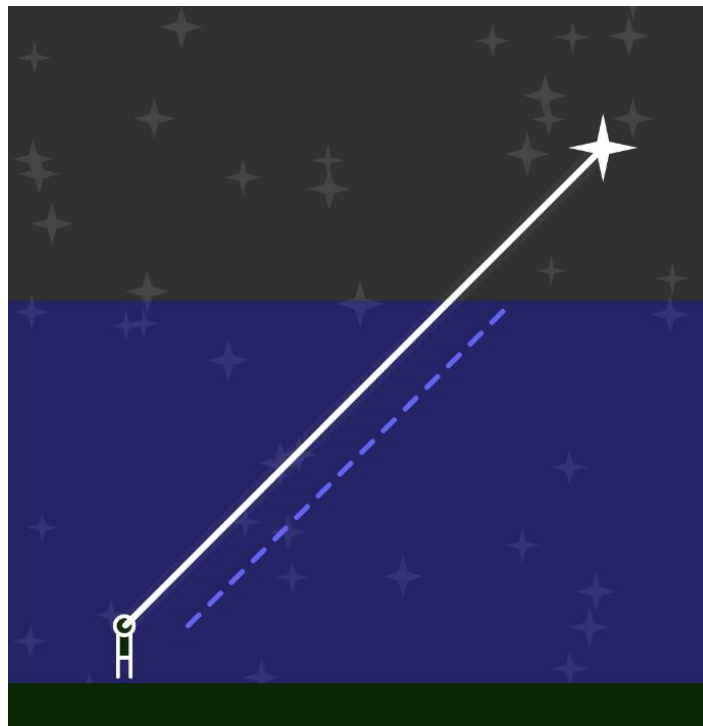


Figura 18. Simulación de Centelleo Estelar, la luz de la estrella se moverá debido al efecto de la atmósfera, en mayor o menor medida según la cantidad de aire atravesado.

5.8.3. Arquitectura del Software

Esta simulación está toda controlada por los dos archivos `twinkle.js` y `twinkle.html`. El camino que sigue la luz es una línea cuyo final está controlado por una función de ruido. Todos los archivos están en la ruta `games/astroposition/`.

5.9. Rocas Espaciales

5.9.1. Modelo Teórico

La interacción entre las rocas espaciales y la atmósfera de nuestro planeta dan origen a diversos fenómenos y nomenclaturas. En particular, rocas fuera de la atmósfera pueden ser conocidas como asteroides, micro-meteoroides, o simplemente meteoroides, según su tamaño o parámetros orbitales alrededor del sol, si es que proviene de dicha órbita. Diversas fuentes asignan diversos nombres, para esta simulación se dejó “Meteoroides”. Cuando este cuerpo entra a la atmósfera, y debido a la interacción con la fricción del aire comienza a quemarse, se le llama “Meteoro”, desde el suelo puede verse como un destello, o “estrella fugaz”. Si el cuerpo es pequeño, se quemará completamente en la atmósfera. Pero si es lo suficientemente masivo, alcanzará el suelo, liberando toda su energía cinética en forma de una explosión, que seguramente dejará un cráter de impacto. Cuando esto ocurre, el objeto resultante es un “Meteorito”.

5.9.2. Experiencia de Usuario

El usuario mueve el mouse y lo sigue una roca espacial. Según su ubicación en el espacio o la atmósfera, saldrá una etiqueta de: Meteoroides, meteoro, meteorito. El objetivo es enseñar sobre la diferencia entre estos tres objetos de manera interactiva. El meteorito solo aparece cuando el usuario estrella la roca contra el suelo, generando una gran explosión.



Figura 19. Distintas vistas de la simulación de Rocas Espaciales

Se puede pensar una mejora del diseño de esta simulación agregando también asteroides, cometas, así como mejorar la gráfica del meteorito para hacerla más llamativa, y quizá hacer que se desvanezca aleatoriamente en la atmósfera.

5.9.3. Arquitectura del Software

Para esta simulación se dibujó un meteorito y sus llamas. El resto de elementos son usados de las otras simulaciones (el personaje, las estrellas de fondo). Todos los archivos están en la ruta `games/astroposition/meteor/`.

5.10. Radiación de Cuerpo Negro

5.10.1. Modelo Teórico

Para entender los procesos radiativos de las estrellas, es preciso hablar del modelo de cuerpo negro. Estos son objetos hipotéticos que no reflejan ningún tipo de luz, sino que absorben cualquier radiación externa; como consecuencia, a temperaturas normales se veían totalmente negros. Sin embargo, al calentar un cuerpo negro, este comenzará a emitir luz propia, determinada por la Ley de Planck.

La Ley de radiación de Planck describe la radiación emitida por un cuerpo en función de su temperatura (T) y la longitud de onda a la cual se observe (λ). Este cálculo se puede lograr con la siguiente ecuación:

$$F(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Donde h , c y k son las constantes de Planck, la velocidad de la luz, y la constante de Boltzman, respectivamente. Esta ley se utiliza ampliamente en la astrofísica para predecir la radiación emitida por objetos astronómicos, y dictamina que las estrellas más calientes (alrededor de 10000K) brillan en la parte azul del espectro visible, mientras que las estrellas más frías (2000K) brillan en la parte roja del espectro. Además, mucha de la luz que emiten las estrellas es invisible a la vista, ya que está en longitudes de onda por fuera del visible, como infrarrojo, o ultravioleta.

Adicionalmente, a partir de la Ley de Planck se puede obtener otra ley importante en astronomía: La Ley de Wien, que permite calcular la longitud de onda en la que un cuerpo emite la máxima cantidad de luz.

$$\lambda = \frac{b}{T}$$

Donde b es la constante de Wien, con un valor de $2.90 \times 10^{-3} mK$, y la temperatura se mide en Kelvin.

5.10.2. Experiencia de Usuario

Basada en una simulación similar de PhET¹⁹, el estudiante puede controlar la temperatura de una estrella, cuyo color cambiará de acuerdo a la temperatura que tiene el cuerpo. Además, se podrán observar elementos asociados al concepto de cuerpo negro, como el valor de la temperatura en Kelvin y Celsius, una flecha que señala el pico de emisión obtenido según la ley de Wien, y la longitud de onda asociada a ese pico de emisión en nanómetros.

¹⁹ <https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum>

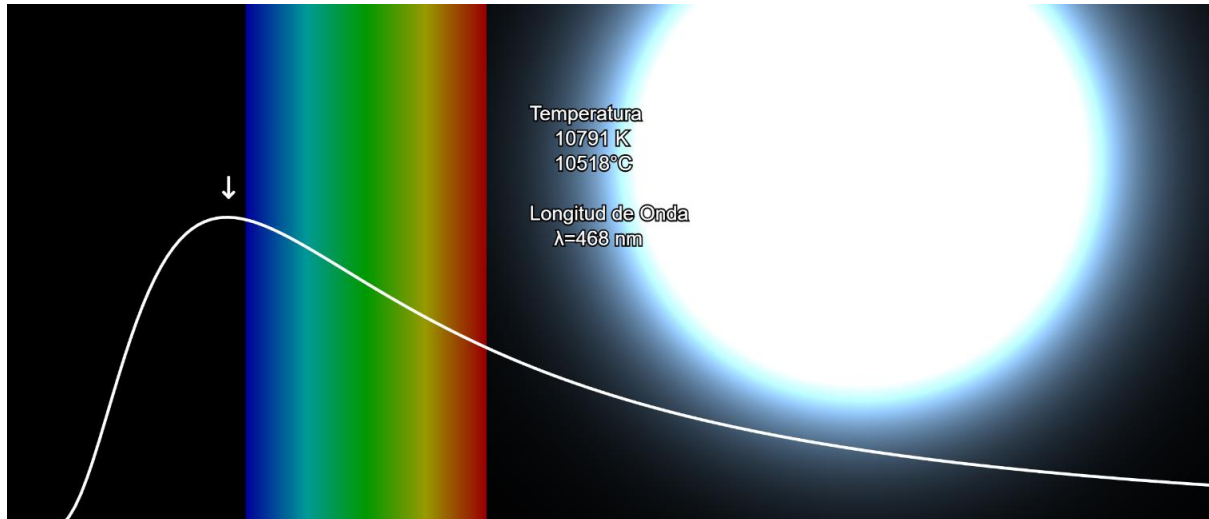


Figura 20. Simulación de Radiación de Cuerpo Negro y Ley de Planck

5.10.3. Arquitectura del Software

Todos los archivos están en la ruta `games/physics/planck/`:

- `planck.html`: Carga la página web.
- `planck.js`: Inicializa variables, y según la posición del mouse asigna una temperatura, que luego será pasada a través de la función de Planck y se generarán los puntos de la curva de radiación. También muestra el texto en pantalla.
- `planck.vert`: Inicializa la geometría de *WebGL*.
- `planck.frag`: Dibuja el espectro continuo y la estrella, según los valores de intensidad arrojados por la función de Planck.

5.11. Heliocentrismo y Geocentrismo

5.11.1. Experiencia de Usuario

Es una muestra geométrica del movimiento de los planetas en los modelos heliocéntricos y geocéntricos. Es útil para hablar en clase sobre la revolución copernicana y los distintos modelos del sistema solar.

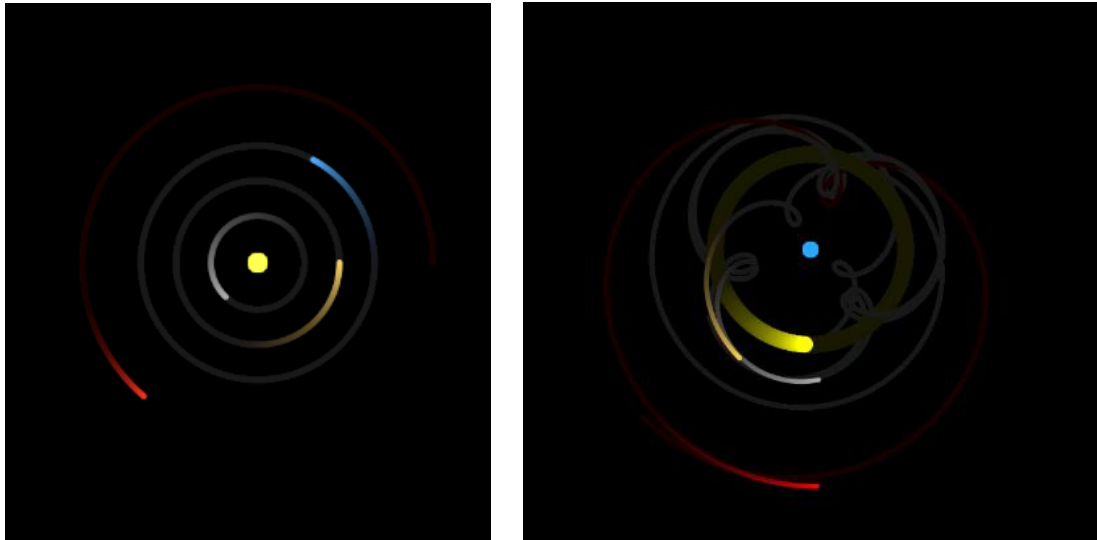


Figura 21. Distintas vistas de la simulación de Heliocentrismo y Geocentrismo.

Se puede pensar en expandir esta simulación para mostrar ambos modelos simultáneamente, para compararlos. Serviría asimismo para hablar de movimiento retrógrado.

5.11.2. Arquitectura del Software

Todos los archivos están en la ruta `games/astroposition/`. La simulación se maneja en `heliocentric.html` y `heliocentric.js`. Este último calcula las posiciones de los planetas en coordenadas polares, y también en coordenadas geocéntricas, y según el modelo seleccionado se encarga de mostrarlos en pantalla.

5.12. Trigonometría Interactiva

5.12.1. Modelo Teórico

El modelo del círculo unitario es muy útil para enseñar las características de las funciones trigonométricas: en un círculo de radio 1, se puede dibujar el radio en diferentes puntos sobre la circunferencia. Las coordenadas de dicho punto respecto al centro determinarán los valores del seno y el coseno, dibujados respectivamente como una línea roja vertical y una línea verde horizontal.

5.12.2. Experiencia de Usuario

Según la posición del mouse, el radio de un círculo unitario adquiere distintas direcciones, y se muestra en pantalla el valor de su proyección vertical y horizontal, es decir, el valor del seno y el coseno.

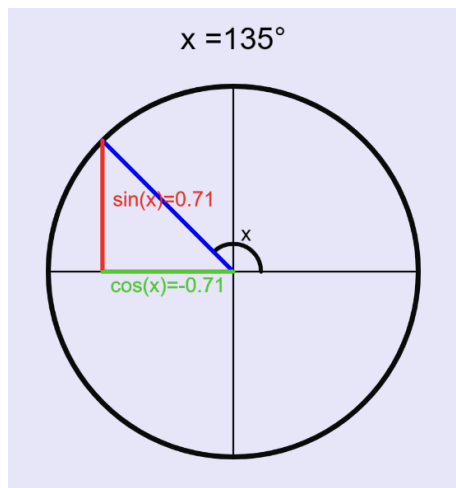


Figura 22. Simulación de Trigonometría.

5.12.3. Arquitectura del Software

Todos los archivos están en la ruta `games/math/`: `trig.html` y `trig.js`, simplemente dibujan un círculo y calcula los valores trigonométricos.

5.13. Otras simulaciones no desplegadas y prototipos

Como se mencionó en el capítulo 4, durante la etapa de exploración y prototipado, se crearon algunas simulaciones que solo se pueden correr con el software de Processing²⁰ en modo Python. Estos prototipos pueden encontrarse en el repositorio de GitHub del autor.²¹

5.13.1. Agujero negro

Un simulador de un agujero negro comiendo estrellas. Fue utilizado junto con Processing para enseñar conceptos básicos de programación en algunos cursos del Planetario de Medellín.

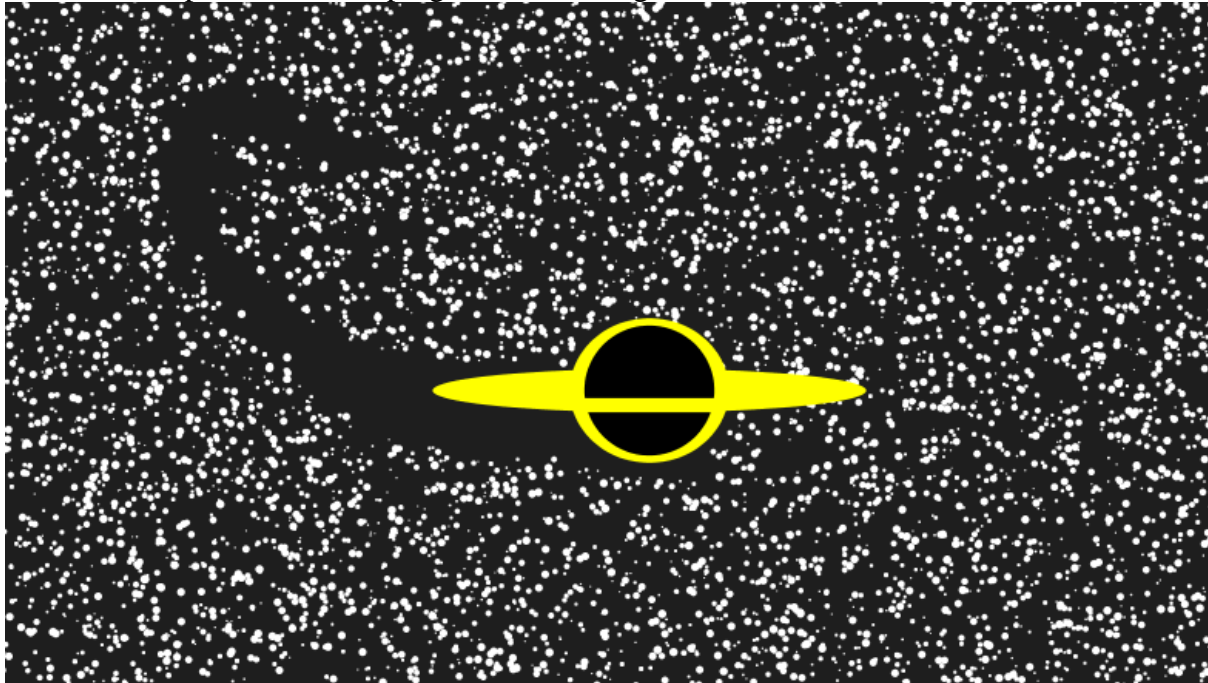


Figura 23. Simulación de Agujero Negro comiendo estrellas.

²⁰ <https://processing.org/>

²¹ <https://github.com/AgustinVallejo/Processing>

5.13.2. Fotón escapando del interior del sol

Visualización del camino aleatorio que toma un fotón para salir del núcleo estelar, y la cantidad de tiempo aproximada que tarda.

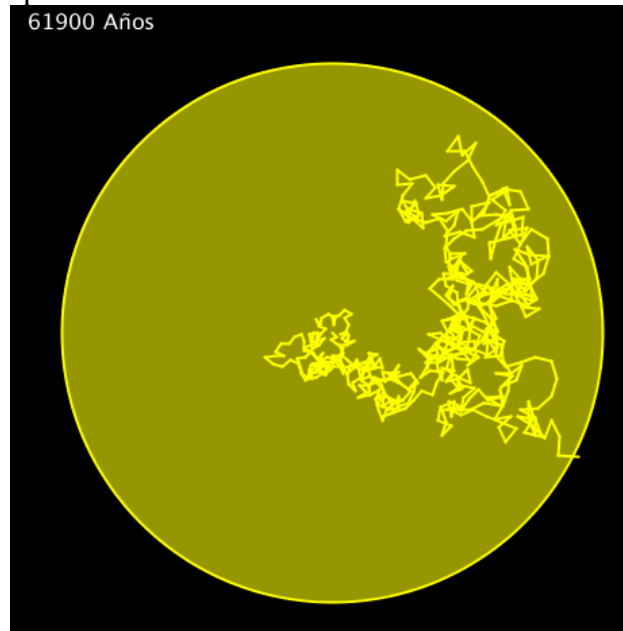


Figura 24. Simulación de fotón escapando del Sol.

5.13.3. Formación de anillos y límite de Roche

Se muestra una luna conformada por cientos de partículas que orbitan en órbitas keplerianas. Inmediatamente comienza la simulación, se desarma la luna y se puede ver el proceso de formación de anillos alrededor del planeta.

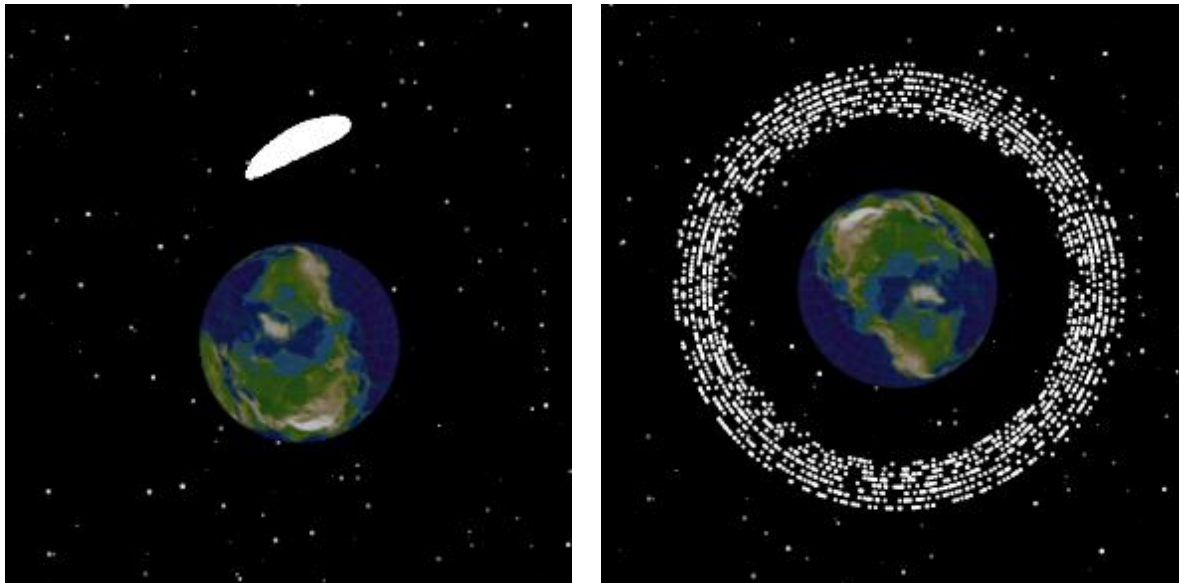


Figura 25. Distintos momentos de la simulación de Formación de Anillos

5.13.4. Tipos de órbitas

Dos simulaciones que muestran los distintos tipos de órbitas logrados según distintas posiciones y velocidades iniciales. Luego esta sería la base para crear el simulador de órbitas (5.2).

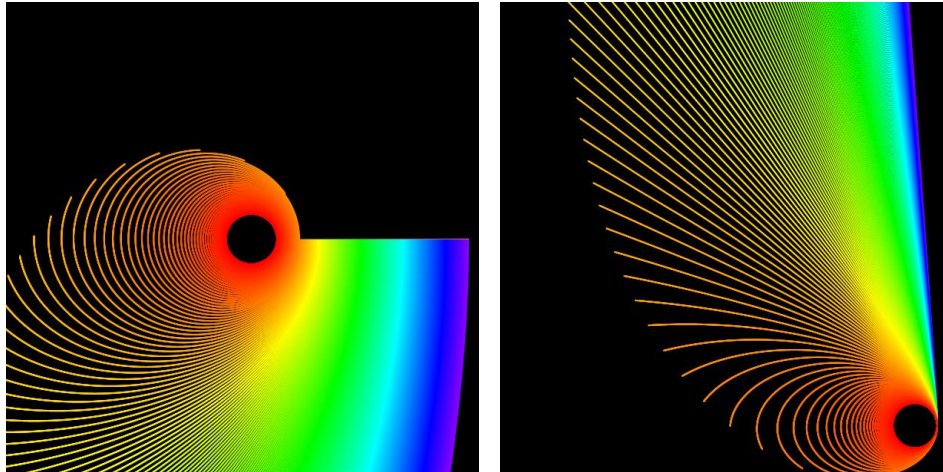


Figura 26. Tipos de órbitas según posiciones y velocidades iniciales.

5.13.5. Efecto Doppler

Un emisor genera ondas circulares cada intervalo corto de tiempo, mientras sigue el movimiento del mouse u otros movimientos predeterminados. Así, cuando el emisor se mueve, inmediatamente se puede percibir el efecto Doppler en acción, al menos geométricamente. La parte visual de la simulación se logró, pero termina siendo más un experimento de arte digital que una simulación educativa.

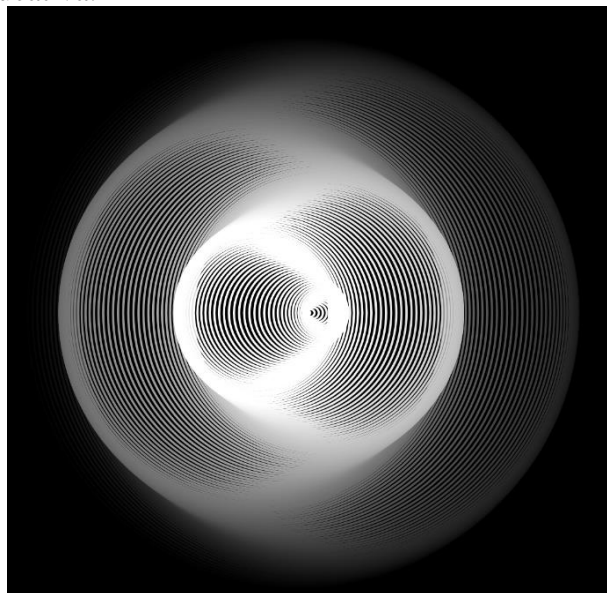


Figura 27. Simulación de efecto Doppler con una partícula oscilando horizontalmente.

En la Figura 27 se muestra una configuración inicial del programa, en la que el emisor se mueve de forma armónica hacia los lados. Se podría pensar que la imagen resultante tiene cierta asociación con la generación de ondas electromagnéticas; pero, de nuevo, no se ahondó en el proceso pedagógico de esta simulación.

Esta simulación no se encuentra en el sitio web principal, sino en otra página para bocetos de código visual, llamada OpenProcessing.²²

²² <https://openprocessing.org/sketch/1250011>

6. Estrategias pedagógicas con la simulación de Evolución Estelar

Dado el alcance del proyecto, aunque se desarrollaron más de 17 simulaciones, se enfocaron los esfuerzos de evaluación solamente en la simulación de *Evolución Estelar*. Se formularon cuatro objetivos de aprendizaje que aborda la herramienta, alrededor de la cual se diseñó una secuencia didáctica basada en el aprendizaje por indagación. Posteriormente, se evaluó el impacto de la estrategia a través de pruebas de conocimientos.

A continuación, se describe a fondo la estructura interna de la simulación, así como el recorrido y las decisiones tomadas para llevar la herramienta al nivel deseado.

6.1. Alcance de la simulación

La intención de crear una simulación que muestre los procesos de evolución estelar surge de la carencia de modelos mentales descrita por Slater et al. (2015) y la presencia de este tema en los estándares de competencias básicas del Ministerio de Educación Nacional²³: “Describo el proceso de formación y extinción de estrellas”. Para abordar este fenómeno astrofísico se plantearon cuatro objetivos de aprendizaje, los cuales se usaron como referente constante para el diseño tanto de la simulación como de la secuencia didáctica asociada. Estos fueron:

- Observar que las estrellas también tienen procesos de formación, evolución y destrucción.
- Reconocer las características como masa, temperatura, tamaño y color que diferencian a las estrellas.
- Diferenciar las estrellas según su estado evolutivo e identificar cuáles son las estrellas más comunes.
- Identificar los diferentes cuerpos celestes asociados a los procesos de evolución estelar.

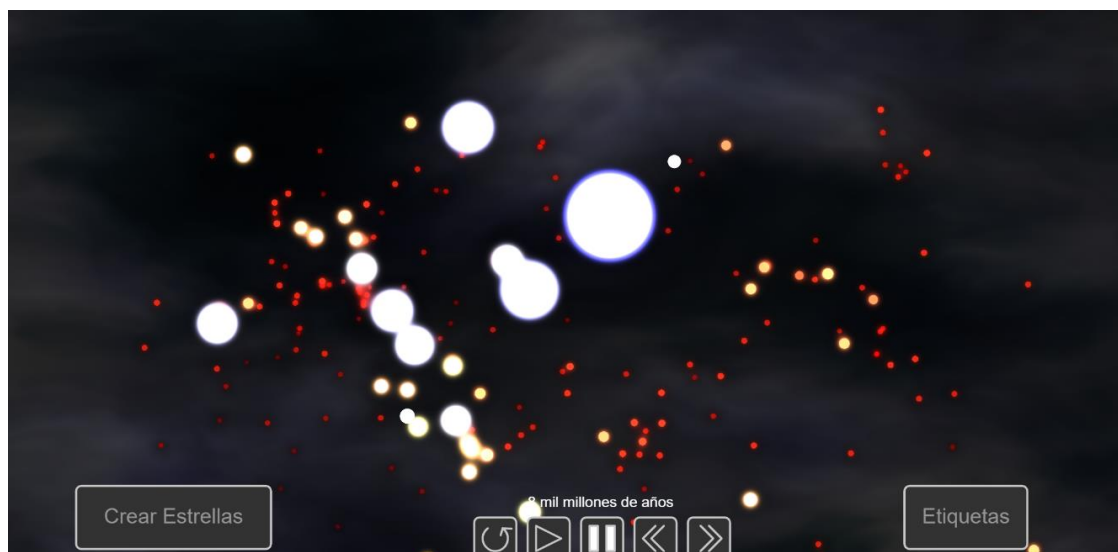


Figura 28. Simulación de Evolución Estelar.

23

https://www.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/files_public/2022-06/Estandares_basicos_competencias-min.pdf

En la simulación de Evolución Estelar, la experiencia de usuario es como sigue: Cuando el usuario detona el proceso de formación estelar se podrán generar una o varias estrellas. Con esto se buscaba replicar el proceso real en el cual las nubes proto-estelares dan origen a muchas estrellas pequeñas o pocas estrellas masivas. Cada una de las estrellas creadas, vistas como círculos brillantes de diversos tamaños y colores, tendrá diferentes rutas evolutivas, las cuales serán descritas en detalle más adelante. Finalmente, todas las estrellas morirán, dejando remanentes estelares como enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros.

La simulación tiene dos botones de control a cada lado: “Crear Estrellas” y “Etiquetas”. Con el primero, se da inicio al proceso de formación estelar, que dentro del programa asigna un número aleatorio entre 1 y 20, y crea la misma cantidad de estrellas con una masa virtual de $1/N$. Esta masa virtual es una variable interna que servirá para asignar el resto de propiedades al cuerpo, como color, tiempo de vida medio, tamaño, etc. El segundo botón activará las etiquetas de las estrellas, que muestra información relevante para un observador: El tipo de estrella, la masa verdadera que tiene, y su edad.

Cuando decimos que “una estrella nace”, en el contexto de la simulación lo que ocurre es un proceso conocido en programación como *instanciamiento*, es decir, se crea un nuevo objeto de la clase Estrella. Estos nuevos objetos tendrán diversas propiedades que permitirán su manipulación, tales como ID único, posición, velocidad, tiempo de vida, color, indicadores de si siguen vivos, entre otros. Asimismo, conforme pasa el tiempo en la simulación, la edad de la estrella aumenta, y diversas funciones determinan su desarrollo. Este procedimiento es muy común en programación orientada a objetos, especialmente para manejar muchos conjuntos de partículas o agentes, y cambios pequeños en dichas funciones darán resultado a propiedades emergentes muy interesantes (Shiffman 2012). Algunas de estas funciones son:

- **Moverse:** En simulaciones de partículas, esta función actualiza la posición a partir del vector velocidad. Para el caso de Laboratorio Estelar, se agregó un par de movimientos que no corresponden a la dinámica de estrellas en cúmulos o galaxias, pero que pueden tener un efecto más llamativo en un usuario. Al nacer, las estrellas salen en direcciones aleatorias pero frenan rápidamente con un coeficiente de fricción aleatorio, simulando un “burst” de nacimiento estelar. Luego de eso, se mueven por la pantalla con un ruido browniano, imitando las complejas interacciones gravitacionales al interior de un cúmulo estelar.
- **Dibujar:** Simplemente dibuja un círculo en la posición del objeto y con el color propio. Aprovecha la función para dibujar círculos que provee Processing (ver sección de Desarrollo de Software). Además, si la opción de etiquetas está activada, muestra el tipo de estrella, la masa verdadera que tiene, y su edad.

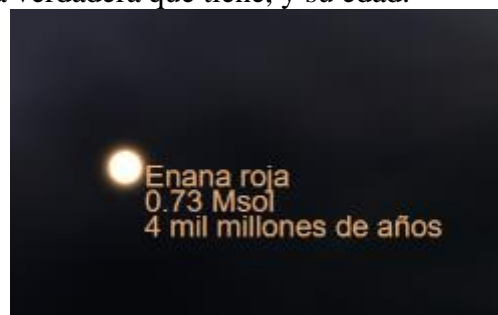


Figura 29. Ejemplo de etiquetas estelares.

- **Evolucionar:** Es la función encargada de avanzar el reloj interno del objeto estrella, sumando un dt en cada iteración. Dependiendo de su edad relativa y su masa, la estrella seguirá ciertas rutas. Si es joven, estará en la secuencia principal y su cambio será mínimo, luego de lo cual entrará a la fase de gigante roja, donde el tamaño crecerá a la tasa de 10^4 , y asimismo su color se irá tornando más rojo. En el tema del color, se hace uso de una combinación de funciones matemáticas para obtener, a partir de la masa y la edad, tres valores numéricos para rojo, verde y azul que se asemejen al color buscado de las estrellas. Cuando la estrella supera cierta edad, que es distinta para cada masa inicial, puede convertirse en una enana blanca, en cuyo caso el dibujo de la estrella se vuelve un círculo gris que se va oscureciendo (enfriando) con el tiempo; una estrella de neutrones, representada como un círculo blanco; o un agujero negro, representado como un círculo negro con borde amarillo, que simboliza el disco de acreción.

Además de la clase *Estrella*, también se creó un objeto *Estrellas*, que posee el registro de todas las estrellas que nacen o mueren a lo largo de la simulación, y es el encargado de ordenarle a cada estrella que se mueva, dibuje y evolucione. También, cuando una estrella masiva muere, momentáneamente crea un nuevo objeto Supernova, cuya única finalidad es mostrar una onda expansiva en pantalla.

6.1.1. Pruebas de diseño

La simulación pasó por varias etapas de diseño, en las cuales se trataba de mejorar la experiencia de usuario, de modo que se logaran los conceptos a objetivos de aprendizaje al momento de usarla en un proceso de enseñanza. Adicionalmente, siguiendo las sugerencias de PhET, hubo varias etapas de pruebas y entrevistas, en donde se replantearon elementos de la herramienta. El principal grupo de control de diseño fue el del Semillero de Astronomía de la Universidad de Antioquia para el semestre 2022-1, quienes probaron varias de las simulaciones y aportaron con su retroalimentación y observaciones. Especialmente útiles eran los comentarios que mostraban una percepción errónea del fenómeno, pues esto revelaba una potencial falla en el diseño de la simulación.

Se probó la simulación en las aulas con maestros de escuela. Para esta aplicación se optó por una versión reducida de la simulación, en la que no se incluye el diagrama Color-Magnitud (o diagrama HR). Esto porque, a pesar de que la representación del diagrama fue útil para explicar a estudiantes de los grupos de diseño conceptos astrofísicos, como luminosidad y temperatura, este tema no hacía parte del alcance de la simulación ni de los objetivos de aprendizaje directos que se podrían abordar con ella.



Figura 30. Simulación de Evolución Estelar con varias estrellas creadas.



Figura 31. Evolución Estelar con las etiquetas activadas. La sobre saturación de información generada en este modo es intencional, y busca generar una noción de todos los datos que pueden extraerse de un grupo de estrellas.

6.2. Secuencia didáctica

Se diseñó una secuencia didáctica, que motivaba el uso de la herramienta a través de estrategias de aprendizaje por indagación. De nuevo, los objetivos de aprendizaje fueron centrales para la creación de este insumo, así como la *Guía para creación de hojas de trabajo del PhET*²⁴. La secuencia se divide en tres momentos de clase: Ideas iniciales, laboratorio, y conclusiones. Toda la secuencia didáctica puede encontrarse en el anexo A.

La sección inicial se centra en traer al aula los conceptos previos de los estudiantes sobre los ciclos de vida de las estrellas, discutiendo con su grupo sobre los conocimientos de estrellas con los que pudieran contar.

Posteriormente, hay de 5 a 10 minutos de libre experimentación con la actividad, en la cual los estudiantes se pueden familiarizar con los controles de la simulación y sus temas. De acuerdo al ritmo de la clase, se resuelven las preguntas de la secuencia didáctica, las cuales, a diferencia

²⁴ https://phet.colorado.edu/files/guides/TeacherGuide_ActivityDesign_es.pdf

de la sección inicial, buscan motivar procesos de aprendizaje por indagación. La secuencia invita al estudiante a describir lo que percibe, o a seguir varias estrellas desde que nacen hasta que mueren, siempre registrando los datos disponibles, sea por las etiquetas (tipo de estrella, masa, edad) o por observación directa (color, tamaño). La idea de esta sección es que los estudiantes reconozcan algunas de las características principales que diferencian a las estrellas y sus principales etapas evolutivas; esto se logra a través de preguntas como las de la Figura 32:

6. Crea una estrella. Dibuja su evolución y registra el tamaño, el color y la edad en la tabla.




| Momento Inicial | Antes de Morir | Resultado ¿Cómo muere? |
|--|---|---|
| Tamaño: Pequeña Color: Roja Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Mediana Color: Amarilla o blanca Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Grande Color: Azul Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |

Figura 32. Ejemplo de uno de los cuadros de las Secuencias Didácticas. Desafortunadamente, como estas eran impresas, el color de las estrellas no quedó en la mayoría de los casos.

Finalmente, se retoman las mismas preguntas iniciales, pero ahora con la nueva información que tienen los estudiantes. Esto con el fin de volver a aterrizar las ideas generadas con la simulación y crear nuevos modelos mentales a partir de los acuerdos y observaciones que todo el grupo realizó. De nuevo, la secuencia didáctica puede encontrarse en el anexo A del trabajo.

7. Experimentos

7.1. Población

Se estableció contacto con el grupo de *maestros amigos de la astronomía* (AstroMAE) del Parque Explora, para desarrollar las actividades con sus estudiantes e intentar medir el nivel de aprendizaje. En total 39 profesores se mostraron interesados en hacer parte de la investigación. Las asignaturas eran en su mayoría de ciencias naturales y matemáticas, en algunos casos ciencias sociales o incluso “todas las materias”. Las instituciones eran principalmente del área metropolitana de Medellín, Colombia; aunque también participaron grupos de otras regiones de Colombia, como Risaralda y Guajira, así como de países como Chile y Uruguay.

Dado el nivel de los conceptos trabajados, se limitó la actividad a grupos de bachillerato, es decir, a grados 6° en adelante, que también correspondía a los niveles en los que enseñaba la mayoría de los maestros.

7.2. Secuencia experimental

Basándonos en Bertram (2020), se pensó el siguiente proceso experimental, para que los docentes aplicaran sobre sus respectivos grupos:

1. **Pre-test:** Aplicación del inventario de conceptos a cada estudiante del grupo, que no han tenido exposición al concepto.
2. **Clase:** Los estudiantes reciben una intervención didáctica que puede ser de dos tipos:
 - a. **Con Divulgador:** Se le presenta al grupo una clase sobre evolución estelar. Es importante aclarar que, debido a que muchos de los docentes no tenían un dominio conceptual del tema, en la mayoría de los casos prefirieron que la clase fuera dictada por estudiantes del pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia. Esto, naturalmente, representó un sesgo significativo en las mediciones, que luego será discutido a profundidad.
 - b. **Con Simulación:** Se utiliza la simulación de evolución estelar, acompañada por la secuencia didáctica. En este caso, era necesario que hubiera al menos un computador por cada tres (3) estudiantes. La idea es recrear un aula activa, en donde el maestro es un guía y los estudiantes cuentan con una hoja de trabajo para el registro de sus observaciones y conclusiones. Se diseñó una propuesta de planeación de clase que los maestros podían usar como guía para el desarrollo de la misma.
3. **Post-test:** Segunda aplicación del inventario de conceptos a cada estudiante del grupo, después de haber recibido la intervención didáctica.
4. **Test de retención (opcional):** En algunos casos, se volvía a aplicar la prueba unas semanas después de la actividad para medir la retención que se tuvo de los conceptos.

La forma de repartir los grupos de simulación y de control se coordinó buscando tener un grupo de muestra similar y significativo en ambos casos.

7.3. Clase con Divulgador

Idealmente, para comparar logros de aprendizaje con la simulación, la clase de control tendría que haber sido dictada por los mismos profesores voluntarios. Sin embargo, estos expresaron no contar con un dominio conceptual del tema de evolución estelar; además, por el alcance del proyecto, tampoco había tiempo para formarlos. Entonces, se decidió enviar a los colegios a estudiantes del pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia, los cuales tenían cierta experiencia en divulgación científica, pero no son docentes expertos. A lo largo del presente trabajo, se referirá a estos estudiantes voluntarios de astronomía como “divulgadores”, para evitar confusiones con los estudiantes que presentaron las pruebas.

La clase con los divulgadores tenía como única instrucción que cumpliera con los objetivos de aprendizaje. A saber:

- Observar que las estrellas también tienen procesos de formación, evolución y destrucción.
- Reconocer las características como masa, temperatura, tamaño y color que diferencian a las estrellas.
- Diferenciar las estrellas según su estado evolutivo e identificar cuáles son las estrellas más comunes.
- Identificar los diferentes cuerpos celestes asociados a los procesos de evolución estelar.

Más allá de eso, cada divulgador decidía si usar recursos adicionales como diapositivas, bombas, actividades, etc. A pesar de esta libertad, estas clases tenían en común que seguían una *estrategia tradicional* en la que el estudiante tiene un rol pasivo; en ellas el docente es el protagonista al ser el poseedor del conocimiento, que a través de la actividad, intentaba transmitirlo a los estudiantes.

La decisión de realizar la clase con divulgadores, en lugar de los maestros, introdujo sesgos inesperados en los resultados de la prueba. Ya no se estaría evaluando una “clase tradicional”, debido a que se añadió la presencia de un actor externo a la clase, y esto, naturalmente, causa que la actitud de los estudiantes cambie frente a una clase tradicional, con el maestro al que están acostumbrados. Esto hizo que no se pudiera determinar si el efecto de la clase con divulgador será mejor o peor a la verdadera clase tradicional.

7.4. Clase con Simulación

La clase con simulación se basó en los principios del aprendizaje activo, buscando que los maestros motivaran a sus estudiantes a explorar la simulación por su cuenta y obtener conclusiones propias. Esta se llevó a cabo siguiendo la secuencia didáctica descrita en el capítulo anterior. Esto incluía una discusión previa de los conceptos que tenían los estudiantes, una parte de experimentación con la herramienta, respondiendo las preguntas y tablas que se pedían en la guía, y finalizando con una puesta en común de los resultados.

7.5. Cuestionario

Para medir el nivel de aprendizaje que tuvo la simulación, se diseñó un inventario de conceptos sobre evolución estelar. Esta buscaba medir directamente el nivel de conocimientos que tenían los estudiantes frente a los objetivos de aprendizaje. Consiste de 10 preguntas que evalúan el entendimiento de algunos procesos astrofísicos relacionados directamente con los objetivos de

aprendizaje abordados en las pruebas de aula (nacimiento y muerte de estrellas, diferencia entre estrellas masivas y pequeñas, etc.)

Inicialmente se iban a usar los insumos de *PhysPort*, un portal de pedagogía para educadores de física, el cual cuenta con hojas de trabajo, sugerencias didácticas, y pruebas para medir aprendizaje de diversas temáticas. En particular, se descargó el *inventario de conceptos de propiedades estelares*, diseñado por Bailey et al. (2011b), cuidadosamente creado a través de entrevistas y análisis de discurso, para evaluar completamente las ideas erróneas que se tenían frente a los temas de astrofísica estelar, valorado por 23 expertos en astrofísica.

La prueba se descargó, con permiso de *PhysPort* fue traducida al español, e incluso ahora figura en el sitio web como una traducción disponible a nombre del autor del presente trabajo²⁵. Sin embargo, al comparar la prueba con las temáticas trabajadas en la simulación y los objetivos de aprendizaje, hubo que descartar muchas preguntas, y reescribir completamente otras. El resultado es una prueba distinta, que a pesar de ser revisada y aprobada por dos (2) profesores de astronomía, no tiene la misma rigurosidad académica de la original, y posiblemente pueda obstaculizar futuros meta-estudios que tengan en cuenta esta investigación. El diseño riguroso de un examen podría pensarse para posteriores exploraciones con las simulaciones aquí realizadas. El inventario de conceptos de evolución estelar también puede encontrarse en el anexo B.

El examen se configuró en una encuesta virtual de Google Forms que los estudiantes responderían en sus dispositivos móviles o los computadores que usaron. Allí se pedía el documento de identidad, que sería luego usado como identificador para comparar pre y post test. Adicionalmente, especificar su grado, institución, y si era la primera, segunda o tercera vez que presentaban la prueba. Si era la segunda vez, se añadían las siguientes preguntas al formulario, calificables de 1 a 5:

- ¿Qué tan interesante fue la actividad?
- ¿Qué tanto siente que aprendió?
- ¿Qué tan claro fue el contenido?

Solo en algunos casos, como no había acceso a dispositivos electrónicos, o por motivos de protección de datos de la institución, los estudiantes respondían en una versión impresa del examen y las respuestas eran después añadidas a la base de datos.

²⁵ En la pestaña Translations, a Spanish: <https://www.physport.org/assessments/assessment.cfm?I=40&A=SPCI>

8. Análisis de Resultados

8.1. Resultados generales

En total, el cuestionario fue completado 656 veces, incluyendo pre-test y post-test. Se filtraron los datos para considerar únicamente estudiantes que presentaron ambos exámenes, tras lo cual quedaron 186 pares de respuestas (372). Las otras 284 respuestas fueron descartadas por la imposibilidad de hacer un seguimiento del aprendizaje. Muchas de ellas son grupos que presentaron el pre-test, pero no habían realizado la actividad y el post-test cuando se realizó este análisis de datos. Otras fueron estudiantes que respondieron mal el formulario, ingresando mal su documento, o marcando pre-test en el post-test.

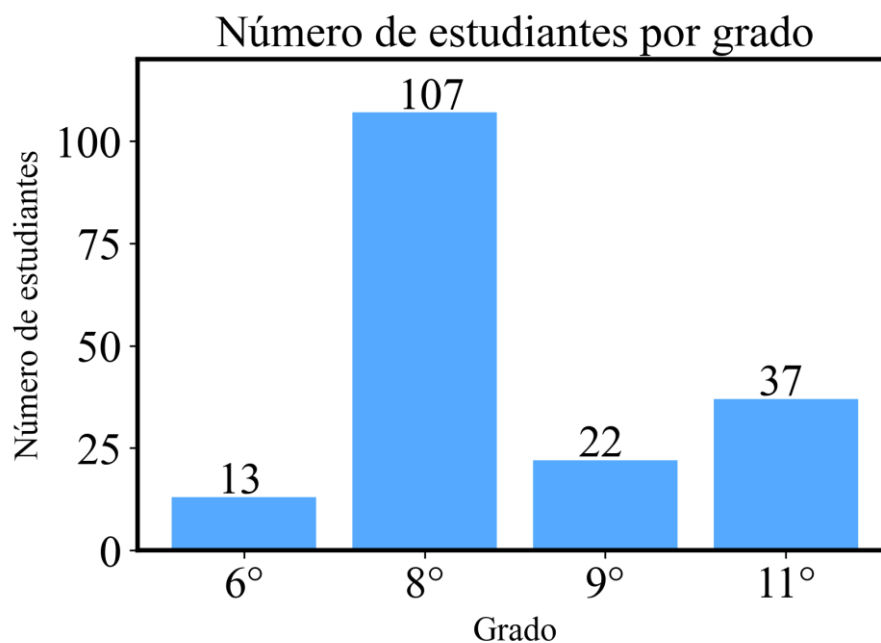


Figura 33. Cantidad de estudiantes por cada grado.

8.2. Análisis por pregunta

A partir de los 186 pares de respuestas obtenidos, se analizaron los resultados pregunta por pregunta de acuerdo a la metodología de evaluación de exámenes de Allen & Yen (1979). Esta metodología sugiere el uso de factores psicométricos, que determinan la sensibilidad y validez de ítems en un examen, y permite que las conclusiones obtenidas sean más fieles a la noción de aprendizaje, y no a posibles sesgos y errores en el diseño de la prueba. Estos mismos análisis estadísticos de pruebas son usados para evaluar conocimientos de astronomía por Bailey et al. (2011) y Slater et al. (2015), así como para evaluar aprendizajes con simulaciones en López (2015).

El primer factor a medir es el *índice de facilidad*, que se define como la proporción de estudiantes que respondió correctamente a una pregunta. Por lo general, se busca que este índice esté dentro de un rango de 0.3 a 0.9 (Allen & Yen, 1979; Haladyna, Downing, y Rodríguez, 2002), fuera del cual las preguntas suelen ser consideradas como “*muy fáciles*” por encima de 0.9, o “*muy difíciles*” por debajo de 0.3.

Puede verse en la Figura 34 que, si miramos únicamente el resultado del post-test, de las diez preguntas del inventario de conceptos, cuatro tendrían que ser descartadas del análisis según el criterio del índice de facilidad. En particular, tres de ellas porque más del 90% de la población la respondió correctamente, siendo esas tres preguntas las de verdadero y falso asociadas a la discusión previa; las otra porque menos del 30% obtuvo un resultado favorable, tanto en simulación como en clase tradicional.

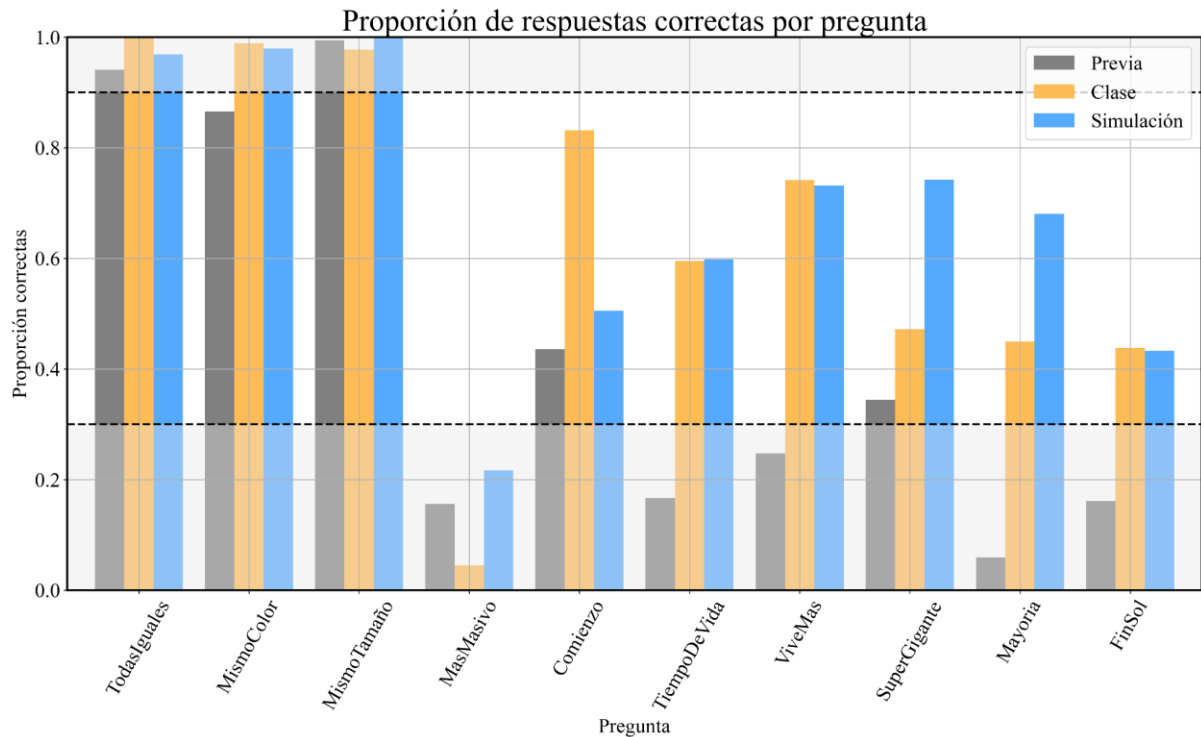


Figura 34. Índices de facilidad por cada pregunta del inventario de concepto, medido como la proporción de estudiantes que responde correctamente. Arriba y abajo se marca el rango de aceptabilidad según Haladyna, Downing, y Rodríguez, (2002). En cada una de las preguntas se puede evidenciar una ganancia en la cantidad de estudiantes correctos respecto a la prueba previa (primera columna - gris). En cada caso se puede comparar el aumento de la proporción de aciertos de la clase con un experto (segunda columna - naranja) y la simulación (tercera columna - azul).

Otro factor para considerar es la ganancia normalizada de aprendizaje “g”, que generalmente se define como la medida del aprendizaje de los estudiantes dividida entre lo que podrían haber aprendido. Se calcula con el puntaje promedio de la prueba previa (PRE) y la posterior (POST) como sigue (Hake, R. R. 1998):

$$g = \frac{POST - PRE}{1 - PRE}$$

En este caso el puntaje máximo de un examen está normalizado a 1. Puede verse en la siguiente tabla la ganancia que tuvieron tanto la simulación como la clase con experto.

| Pregunta | Ganancia Clase Experto | Ganancia Simulación |
|---|---------------------------|------------------------|
| 1. ¿Todas las estrellas son iguales entre sí?*** | 1 | 0.48 |
| 2. ¿Todas las estrellas del cielo son del mismo color?*** | 0.92 | 0.85 |
| 3. ¿Todas tienen el mismo tamaño?*** | -3.18 | 1 |
| 4. ¿Cuál de los siguientes objetos es el más masivo?*** | -0.13 | 0.07 |
| 5. Las estrellas comienzan su vida como | 0.7 | 0.12 |
| 6. ¿Cómo se relaciona el tiempo de vida de una estrella con su masa? | 0.51 | 0.52 |
| 7. ¿Cuál de las siguientes estrellas vivirá más? | 0.66 | 0.64 |
| 8. Una estrella que nace como supergigante azul se convertirá al final de su vida en: | 0.19 | 0.61 |
| 9. Podemos afirmar que la mayoría de estrellas en el universo son | 0.41 | 0.66 |
| 10. ¿Qué le pasará al Sol al final de su vida? | 0.33 | 0.32 |

Tabla 3 Ganancias de aprendizaje en cada pregunta.

8.2.1. Preguntas problemáticas

A continuación se verán las tablas que muestran los resultados de las preguntas que se consideraron inadecuadas para el estudio según su índice de facilidad. En primer lugar se encuentran las preguntas de verdadero y falso asociadas a la sección de ideas previas previas de la actividad. Resaltado en amarillo está la respuesta correcta de cada pregunta.

| 1. ¿Todas las estrellas son iguales entre sí? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|---|-------|------------|----------|
| No, son diferentes | 97.8% | 100.0% | 99.5% |
| Sí, todas son iguales | 2.2% | 0.0% | 0.5% |

Tabla 4. Respuestas de la pregunta 1

| 2. ¿Todas las estrellas del cielo son del mismo color? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|--|-------|------------|----------|
| No, el color varía de estrella a estrella | 98.9% | 99.0% | 87.0% |
| Sí, todas tienen el mismo color | 1.1% | 1.0% | 13.0% |

Tabla 5. Respuestas de la pregunta 2

| 3. ¿Todas tienen el mismo tamaño? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|--|--------|------------|----------|
| No, todas tienen tamaños variables | 100.0% | 96.9% | 95.1% |
| Sí, todas son aproximadamente del mismo tamaño | 0.0% | 3.1% | 4.9% |

Tabla 6. Respuestas de la pregunta 3

Estas preguntas se descartan de la evaluación final, pues, aunque evidenciaron que casi la totalidad de los encuestados tenía una noción de que las estrellas son diferentes entre sí, no permiten identificar una apropiación significativa de conceptos.

Respecto a las preguntas difíciles, se descarta la siguiente:

| 4. ¿Cuál de los siguientes objetos es el más masivo? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|--|-------|------------|----------|
| El Sol | 13.6% | 30.2% | 50.5% |
| Enana blanca | 14.8% | 5.2% | 5.4% |
| Estos objetos podrían tener masas similares | 4.5% | 21.9% | 15.8% |
| Gigante roja | 67.0% | 42.7% | 28.3% |

Tabla 7. Respuestas de la pregunta 4

Esta pregunta representó una dificultad mucho más alta de lo esperada. Se pensó que, al mencionar el recorrido evolutivo del sol, el cuál pasa por gigante roja y enana blanca sin perder o ganar masa significativa, el estudiante podría comprender que estos tres objetos pueden tener una masa similar. Sin embargo, la gran mayoría de estudiantes respondió Gigante Roja, posiblemente debido a la asociación entre “Gigante” y “Masivo”.

Otra pregunta problemática es la número 10, sobre el final del Sol, debido a que existía la opción de marcar varias respuestas, de las cuales dos son correctas y tres incorrectas. Como no se definió en un principio cómo evaluar este tipo de preguntas, queda muy a criterio del investigador. A continuación, se presentan algunas alternativas frente a las respuestas obtenidas.

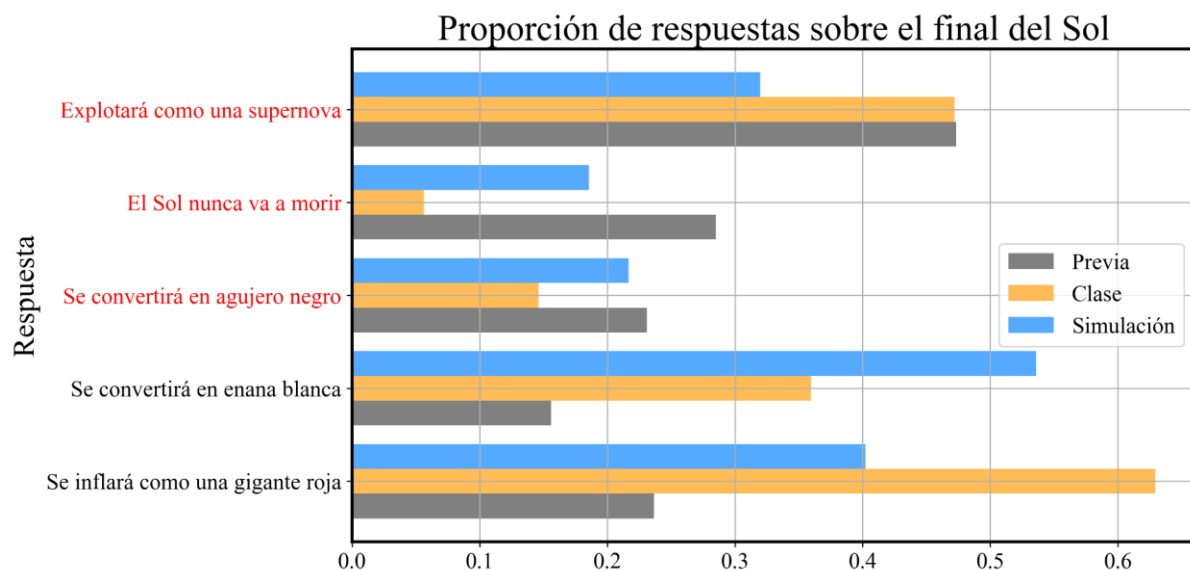


Figura 35. Proporción de respuestas correctas sobre el final del Sol. Las tres columnas en cada opción representan el porcentaje de estudiantes que eligieron esa respuesta en la prueba previa (gris), prueba posterior con divulgador (naranja) y prueba posterior con simulación (azul)

La Figura 35 permite examinar la evolución de las ideas que tenían los estudiantes sobre el Sol: Puede verse que casi la mitad de ellos pensaba que el Sol se convertiría en supernova; tras la intervención, la misma proporción de los estudiantes de la clase tradicional seguían teniendo

esa idea, mientras que la clase con simulación logró reducirla a sólo 30%. Lo contrario ocurre con las ideas erróneas “*el Sol nunca va a morir*” y “*el Sol será un agujero negro*”, cuya reducción es mucho más notable en los estudiantes con clase tradicional, mientras que con la simulación el impacto no es mucho.

En cuanto a ideas correctas, identificar que el Sol terminará como una “*enana blanca*” pasó de 15% en el pretest a un 35% con la clase tradicional y casi a 55% con la simulación. Contrariamente, que el Sol pasará por una fase de “*gigante roja*” creció del 24% en el pretest a 40% con la simulación y 62% con la clase. Se presenta la siguiente tabla para analizar la proporción de estudiantes que respondieron alguna de las dos, o ambas, que a su vez no respondió ninguno de los distractores:

| 10. ¿Qué le pasará al Sol al final de su vida? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|--|-------|------------|----------|
| “Gigante roja” Y “Enana blanca” | 16.9% | 16.5% | 2.2% |
| “Gigante roja” O “Enana blanca” | 43.8% | 43.3% | 16.1% |

Tabla 8. Respuestas correctas a la pregunta 10 según calificación.

Se evidencia que hubo un aumento de respuestas correctas, y si bien los que respondieron ambas fueron una minoría (16% en ambos tipos de clase), también pudo deberse a confusiones por la modalidad múltiple de la pregunta. Se decide entonces otorgar el punto correcto a los estudiantes que respondieron al menos una de las dos opciones correctas, que tampoco será un factor determinante para comparar la clase normal con la simulación.

8.2.2. Preguntas aceptadas

En esta sección se analizan los resultados de las preguntas que no fueron descartadas de la evaluación total. La respuesta correcta se resalta en amarillo, y en los casos en los que uno de los grupos obtuvo un resultado significativamente mayor, se resalta en amarillo intenso, como es el caso de las preguntas 5, 8 y 9.

| 5. Las estrellas comienzan su vida como | Clase | Simulación | Pre-Test |
|--|--------------|-------------------|-----------------|
| Material en la atmósfera de la Tierra | 1.1% | 3.1% | 16.3% |
| Un planeta | 1.1% | 0.0% | 4.3% |
| Un trozo de otra estrella | 9.0% | 26.8% | 16.3% |
| Una enana blanca | 5.6% | 19.6% | 19.0% |
| Una nube de gas y polvo | 83.1% | 50.5% | 44.0% |

Tabla 9. Respuestas de la pregunta 5

A pesar de que la mitad de los estudiantes de la simulación respondieron correctamente, no parece ser una mejora significativa respecto al pre-test, y claramente la clase tradicional obtuvo mejores resultados. Esto puede deberse a una falla en el diseño de la simulación: el único elemento que parecía sugerir que las estrellas nacen a partir de nubes de gas y polvo es el fondo de la simulación, que muestra una nube gris en movimiento. Se había propuesto que dicha nube colapsara localmente antes de formar estrellas, pero tal manejo de la textura del fondo no fue posible por tiempo y dificultad.

Por ahora, mientras no se pueda hacer más explícita la formación estelar en la simulación, se podría pensar en contextualizar a los estudiantes con este proceso, pues es evidente que allí sí destaca la clase tradicional, con el 83% de los alumnos identificando el modelo correcto. Que el profesor comente que las estrellas nacen a partir del colapso gravitacional de una nube de gas y polvo, y sumarlo a la simulación, podría generar resultados muy positivos.

| 6. ¿Cómo se relaciona el tiempo de vida de una estrella con su masa? | Clase | Simulación | Pre-Test |
|---|-------|------------|----------|
| Las estrellas más masivas viven ligeramente más tiempo que las menos masivas. | 12.4% | 11.5% | 18.9% |
| Las estrellas más masivas viven ligeramente menos tiempo que las menos masivas. | 11.2% | 11.5% | 17.2% |
| Las estrellas más masivas viven mucho más tiempo que las menos masivas. | 14.6% | 15.6% | 35.6% |
| Las estrellas más masivas viven mucho menos tiempo que las menos masivas. | 59.6% | 60.4% | 17.2% |
| Todas las estrellas tienen el mismo tiempo de vida | 2.2% | 1.0% | 11.1% |

Tabla 10. Respuestas de la pregunta 6.

| 7.Cuál de las siguientes estrellas vivirá más | Clase | Simulación | Pre-Test |
|---|-------|------------|----------|
| Estrella gigante y azul | 21.3% | 16.5% | 39.9% |
| Estrella mediana y amarilla | 4.5% | 10.3% | 35.0% |
| Estrella roja y pequeña | 74.2% | 73.2% | 25.1% |

Tabla 11. Respuestas de la pregunta 7.

En estas dos preguntas (6 y 7) se puede ver que el resultado es bastante similar para simulación y clase, si acaso existe una diferencia, será de un par de estudiantes. Las dos preguntas evidencian una ganancia conceptual destacable respecto al pre-test.

| 8. Una estrella que nace como supergigante azul se convertirá al final de su vida en: | Clase | Simulación | Pre-Test |
|---|-------|------------|----------|
| Agujero negro | 47.2% | 74.2% | 35.4% |
| Enana blanca | 13.5% | 4.1% | 13.3% |
| Estrella de neutrones | 22.5% | 19.6% | 14.9% |
| Nebulosa | 13.5% | 1.0% | 20.4% |
| Ninguna de las anteriores | 3.4% | 1.0% | 16.0% |

Tabla 12. Respuestas de la pregunta 8.

Este resultado muestra una apropiación significativa del concepto por parte de los usuarios de la simulación, notablemente mayor que los de la clase tradicional. Podría discutirse si “*Estrella de neutrones*” también debería ser considerada como respuesta correcta, ya que es el resultado de una gigante azul. Y no estaba dentro de los objetivos de aprendizaje hablar de la diferencia entre gigante y supergigante, mucho menos del límite de Chandrasekhar. Siendo así, los porcentajes de respuestas correctas serían como sigue: Clase=69.7%, Simulación=93.8%, Pre-test=55.8%. Nuevamente, la simulación muestra mejores resultados enseñando este concepto.

| 9. Podemos afirmar que la mayoría de estrellas en el universo son | Clase | Simulación | Pre-Test |
|---|-------|------------|----------|
| Grandes y azules | 9.0% | 1.0% | 14.1% |
| Medianas y amarillas | 11.2% | 6.2% | 25.5% |
| No hay un tipo de estrella más común | 34.8% | 24.7% | 54.3% |
| Pequeñas y rojas | 44.9% | 68.0% | 6.0% |

Tabla 13. Respuestas de la pregunta 9.

En este punto, nuevamente, hay una ganancia de aprendizaje significativa en ambos grupos; pero la simulación se desempeñó mejor. Uno de los objetivos principales de realizar la simulación de evolución estelar era mostrar visualmente que en el universo abundan las estrellas rojas, mientras que las azules son más raras. Este resultado confirma que se logró este cometido.

8.3. Comparación de pre-test y post-test

A partir de la discusión anterior, se calcularon los puntajes normalizados antes y después de la depuración de las preguntas del test, y se obtuvo el siguiente resultado.

| | Pretest | Posttest | Ganancia |
|------------------------------|---------|----------|----------|
| Test original (10 preguntas) | 0.44 | 0.67 | 0.41 |
| Test filtrado (7 preguntas) | 0.24 | 0.60 | 0.47 |

Tabla 14. Comparación de puntajes promedios en cada prueba y ganancia.

Se puede visualizar, además, la distribución de respuestas, en la Figura 36:

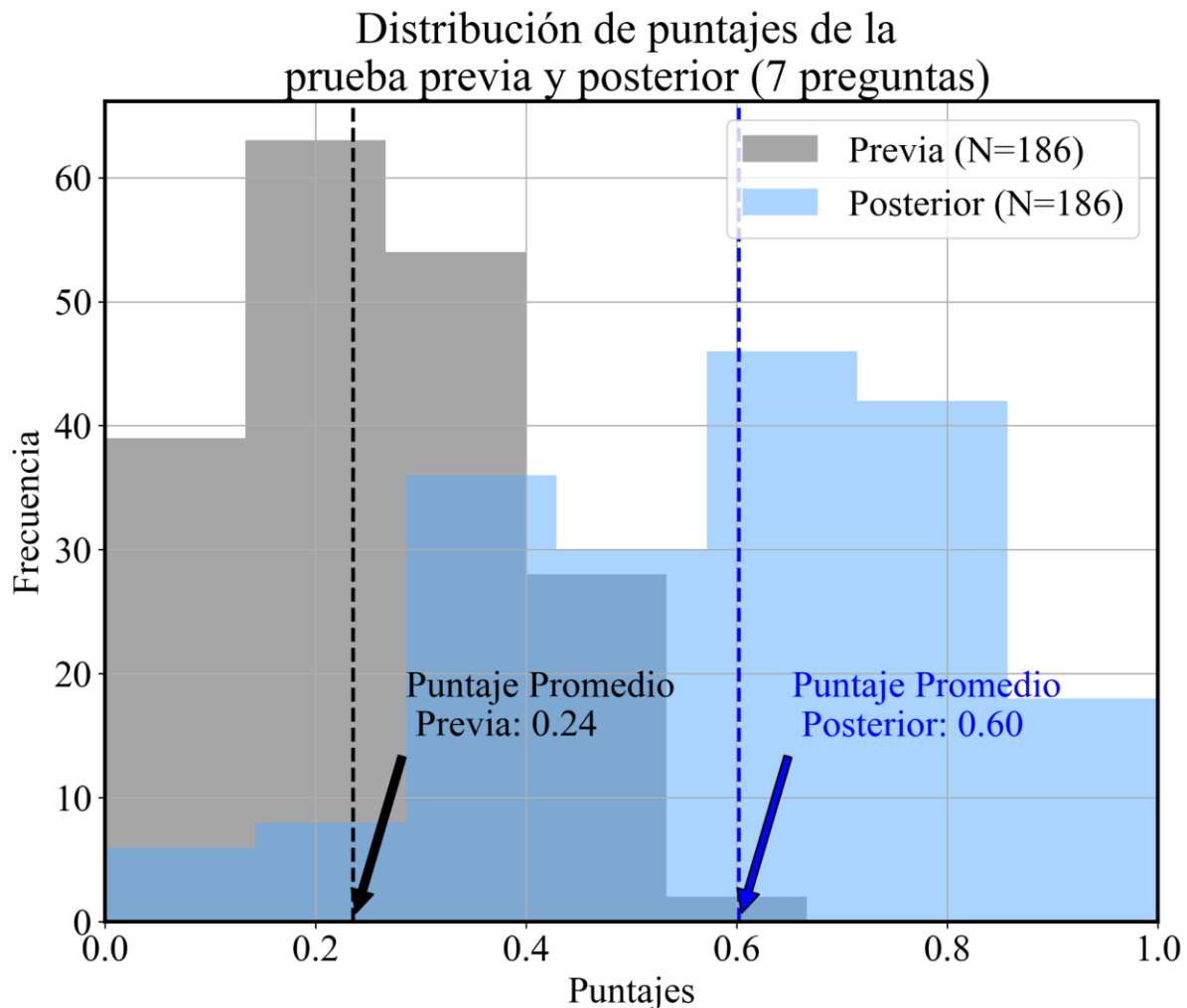


Figura 36. Distribución de puntajes de la prueba previa y posterior. En este caso, la posterior incluye tanto clase con divulgador como con simulación.

La evidencia de ganancia de aprendizaje es clara, siendo el promedio de la prueba posterior incluso cercano al máximo puntaje obtenido en una prueba previa (0.66). Adicionalmente, al comparar puntajes de la prueba previa con la posterior, solo 12 estudiantes de 186 obtuvieron un puntaje menor en la segunda, de ellos 7 eran de la clase con divulgador y 5 de la clase con simulador.

El siguiente paso es, entonces, discriminar estos resultados de pre y post test según el tipo de clase: con simulación o con divulgador.

| | Con Simulación | Con Divulgador |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Test original (10 preguntas) | 0.69 | 0.65 |
| Test filtrado (7 preguntas) | 0.62 | 0.59 |

Tabla 15. Puntajes finales promedio según tipo de clase y prueba final.

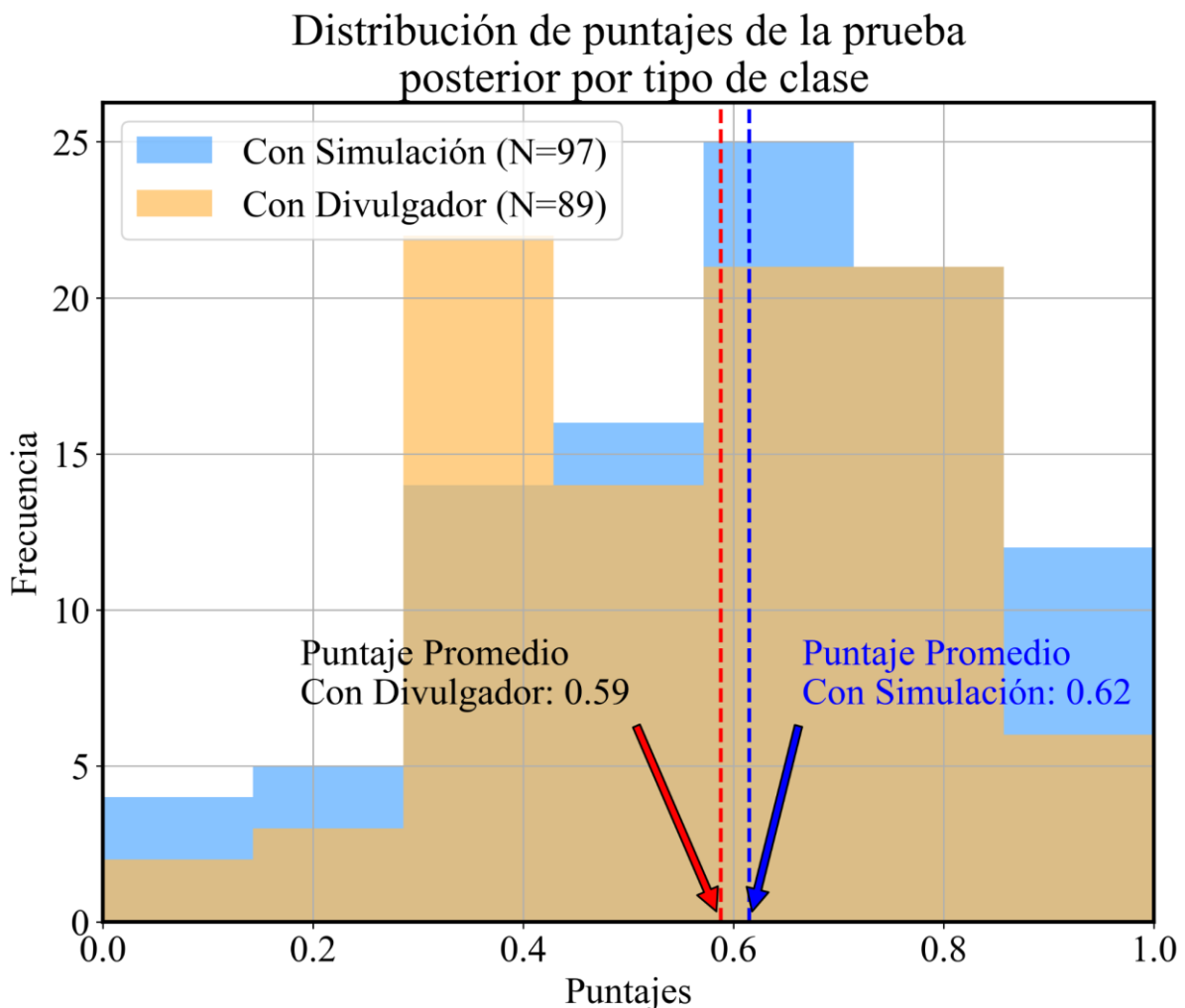


Figura 37. Puntajes de la prueba posterior, diferenciados entre clase con simulación y clase con divulgador. En líneas punteadas se muestra el puntaje promedio de cada una.

La tabla X y la Figura 37 muestran que el puntaje de la prueba posterior es virtualmente el mismo tanto para la clase con divulgador así como para la clase con simulación, ganando este último por 3 puntos porcentuales. Esta ventaja no es estadísticamente significativa bajo ningún criterio. Se puede decir entonces que, juzgando con el inventario de conceptos creado para el presente trabajo, el nivel de aprendizaje de la simulación de *Evolución Estelar* es equiparable al de una clase con un divulgador científico.

8.4. Respuestas de la secuencia didáctica

El escaneo de algunas de las secuencias didácticas puede encontrarse en el anexo D. Varias de las respuestas relevantes se sintetizan a continuación, fueron agrupadas en dos columnas: observaciones acertadas, correspondiente a las ideas correctas que pudieron generar los estudiantes más allá de los objetivos directos de aprendizaje, y observaciones inesperadas, que corresponde a ideas que generaron los estudiantes a partir de la simulación que no estaban previstas, y en algunos casos, son erróneas. Cada fila de la siguiente tabla corresponde a una secuencia didáctica analizada:

| Observaciones acertadas | Observaciones inesperadas |
|--|--|
| - Las estrellas cambian su tipo conforme van envejeciendo | - Las estrellas azules duran mucho tiempo. - Existe el tipo “grande blanca” |
| - Después de un tiempo, todo se consume. | - La vida de las estrellas cambia según la cantidad de energía que generan. |
| - Me llama la atención cómo de una gran estrella azul se puede generar un agujero negro que dure millones de años. | - Una estrella roja pequeña explotará |
| - En algunas ocasiones las estrellas pueden explotar y generar otros cuerpos. | |

Tabla 16. Observaciones de las secuencias didácticas.

8.5. Percepción de los estudiantes

Frente a la encuesta de percepción de la actividad, se obtuvieron los siguientes resultados:

| Pregunta | Con Simulación | Con Divulgador |
|--|----------------|----------------|
| ¿Qué tanto siente que aprendió? | 4.00 | 4.27 |
| ¿Qué tan claros fueron los conceptos? | 4.05 | 4.71 |
| ¿Qué tan interesante fue la actividad? | 4.42 | 4.84 |

Tabla 17. Resultados de encuesta de percepción de los estudiantes.

Puede verse que la clase con el divulgador fue mejor recibida por los estudiantes en los tres ítems evaluados: percepción de aprendizaje, claridad de los conceptos, e interés en la actividad. En las siguientes figuras, se agrupan las respuestas a los ítems de percepción (eje X) versus el puntaje promedio del inventario de conceptos (eje Y). Por ejemplo, el puntaje promedio de todos los estudiantes que percibieron un aprendizaje de 5 y tuvieron clase con simulador es de 0.75, como se puede ver en la Figura 38.

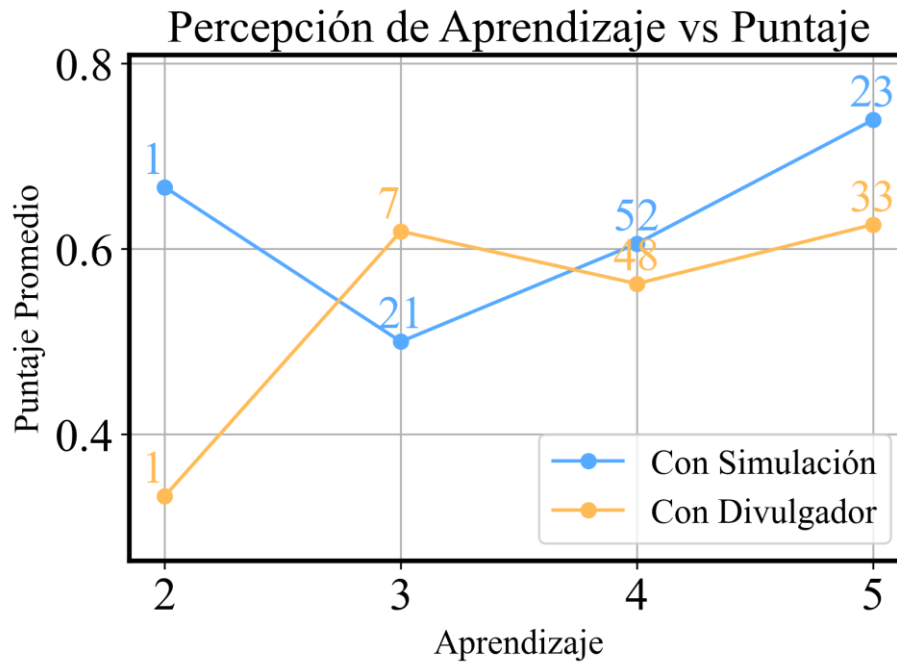


Figura 38. Puntajes promedio de la prueba posterior agrupados por percepción de aprendizaje.

La Figura 38 sugiere que, al agrupar por percepción de aprendizaje, calificada de 1 a 5, en el caso de la simulación, los estudiantes que más percibieron haber aprendido también son, en promedio, los que mejores puntajes obtuvieron, salvo el caso del estudiante que marcó un aprendizaje de 2, pero obtuvo un puntaje de 65% en la prueba. Para el grupo con divulgador, la percepción de aprendizaje parece no haber tenido correlación con el puntaje promedio, ya que sin importar el haber percibido un aprendizaje de 3 o de 5, el puntaje promedio está alrededor de 60%.

Las investigaciones sobre aprendizaje activo sugieren que, cuando se compara aprendizaje activo con tradicional, los estudiantes de aprendizaje activo suelen reportar un menor índice de percepción de aprendizaje, a pesar de que obtienen mejores resultados (Deslauriers et al., 2019). Para nuestro caso, si bien el grupo de simulación reportó un promedio de percepción de aprendizaje más bajo que el de clase con divulgador (4.00 vs 4.27), los estudiantes que expresaron mayor aprendizaje también fueron los que mejores resultados obtuvieron.

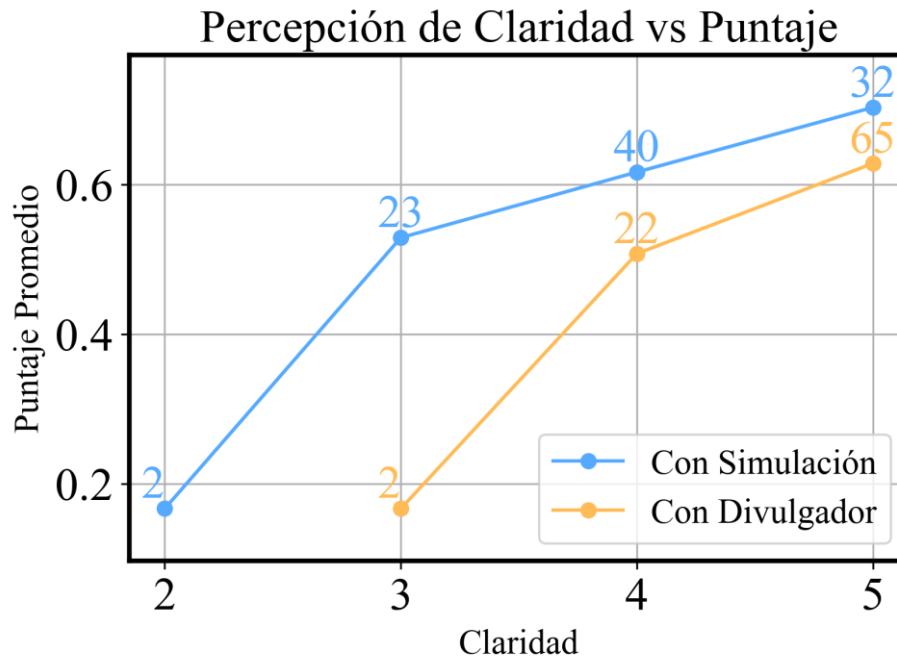


Figura 39. Puntaje promedio de la prueba, agrupado por percepción de claridad.

Se pidió a los estudiantes calificar sobre 5 la claridad del contenido presentado. Como puede verse en la Figura 39, casi todos los estudiantes con divulgador puntuaron 4 o 5, mientras que muchos estudiantes de la clase con simulador puntuaron 3 y la mayoría 4 (Se consideran los puntos con 2 respuestas como outliers). Sin embargo, agrupando por percepción de claridad, la simulación obtuvo un mejor puntaje promedio en todos los casos. Incluso, los 23 estudiantes que puntuaron una claridad de 3 con el simulador obtuvieron, en promedio, un mejor puntaje que los 22 que puntuaron claridad de 4 en clase con divulgador.

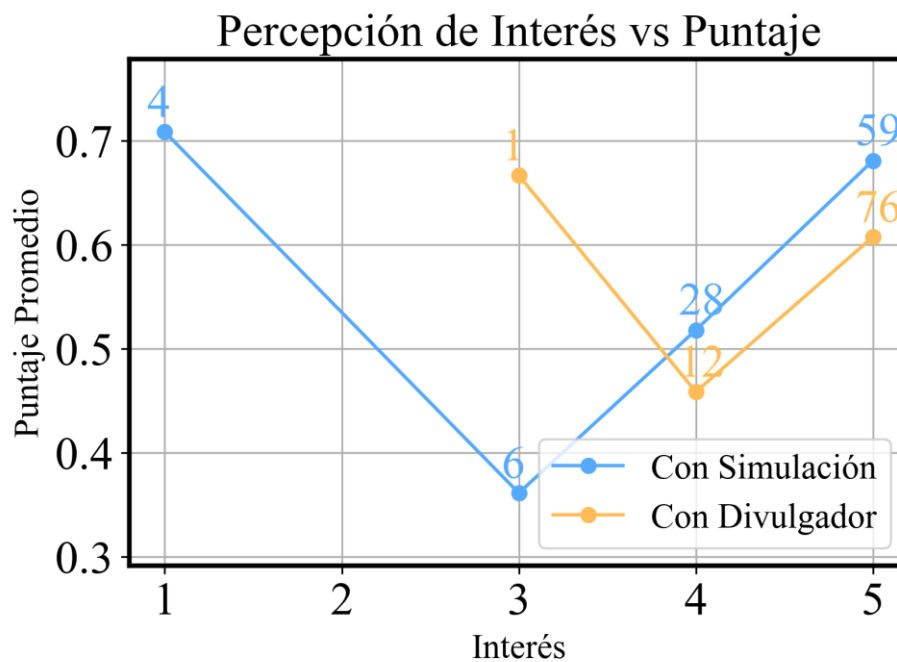


Figura 40. Puntaje promedio de la prueba posterior, agrupado por interés en la actividad.

Nuevamente, en cuanto a puntaje del test, la simulación obtuvo mejores puntajes en la mayoría de estudiantes, agrupados por nivel de interés con la actividad. Al mismo tiempo, las charlas con los divulgadores generaron un interés casi unánime en los participantes.

8.6. Percepción de los maestros

Se realizaron varias reuniones de retroalimentación posterior con los maestros para escuchar sus percepciones generales frente al uso de las simulaciones en el aula. Hubo muchas menciones sobre la experiencia de tener un estudiante de astronomía enseñando el tema, comentarios que más adelante serán discutidos. La siguiente tabla sintetiza los comentarios más frecuentes recogidos durante las reuniones:

| Comentarios favorables | Comentarios desfavorables y propuestas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Los estudiantes estaban muy apasionados. - Les encantan los agujeros negros, tienen muchas preguntas. - Surgieron muchas discusiones en el grupo. | <ul style="list-style-type: none"> - La secuencia didáctica fue muy larga. Algunos grupos incluso no la terminaron. - Hubo problemas técnicos con algunos navegadores. |
| <ul style="list-style-type: none"> - En cuestión de minutos empezaron a hablar de conceptos astrofísicos. - Se sorprendían mucho al ver lo que les pasaba a las estrellas. - La población de la institución normalmente es muy olvidada, es muy valioso contar con estas herramientas. | <ul style="list-style-type: none"> - Secuencia didáctica muy larga. |
| <ul style="list-style-type: none"> - Un estudiante dijo que le mostraría la simulación a la mamá. - Había mucho interés. | <ul style="list-style-type: none"> - Hubo problemas técnicos con los computadores. - Se podría hacer más énfasis en la creación estelar, la composición y la secuencia principal. - Había muchos datos mostrados en pantalla. |
| <ul style="list-style-type: none"> - Como es una población rural, es difícil tener acercamiento a estos temas. - Me sorprendió el aprendizaje tan veloz que tuvieron - Con la simulación se fijaron mejor los conceptos | <ul style="list-style-type: none"> - Hubiera sido bueno aplicar la actividad en primaria. |
| <ul style="list-style-type: none"> - Los estudiantes se mostraron muy interesados | <ul style="list-style-type: none"> - Hubo que aclarar conceptos que no se mencionan en la aplicación: Helio, gas estelar. - Hubo varios problemas de conectividad y se fue la electricidad. |

Tabla 18. Comentarios de los profesores.

8.7. Impacto de los divulgadores

Como se ha mencionado, dado que los maestros participantes no tenían un dominio conceptual del tema de evolución estelar, se planteó la posibilidad de que la “clase tradicional” fuera dictada por astrónomos en formación de la Universidad de Antioquia (referidos en este trabajo como “divulgadores”). Si bien esta clase se podría llamar tradicional porque está centrada en el profesor y sus conocimientos, al comparar el perfil de los docentes con el perfil del divulgador, se evidencia una diferencia significativa:

| Perfil del docente | Perfil del divulgador |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Formación profesional en docencia. - Poca o nula preparación en temas astronómicos. - Es la figura a la que los estudiantes están acostumbrados. | <ul style="list-style-type: none"> - Poca o nula formación pedagógica, aunque experiencia en divulgación astronómica. - Formación profesional en astrofísica. - Es un “invitado (a) especial”. - Es un “científico” - La sola presencia representa un rompimiento con la forma habitual de la clase. |

Tabla 19. Perfiles del docente y del divulgador.

Puede verse que, al dictar la clase con un divulgador, experimentalmente se anula la idea de “grupo de control”, ya que se están ingresando variables nuevas al sistema, cosa que no ocurriría si la clase la hubieran dictado los docentes voluntarios con algo de capacitación en el tema.

Adicionalmente, el tener un invitado especial en la clase inmediatamente generó una reacción en los estudiantes con la que no se contaba. Algunos de los comentarios de los docentes sobre esta intervención didáctica fueron:

- “Los estudiantes tenían muchísimas preguntas para el divulgador”
- “Nunca habían visto a un astrónomo, eso los motivó mucho”, esta en particular fue en el colegio de La Guajira, donde la intervención fue virtual.
- “La posibilidad de interactuar con un estudiante universitario los inspira, y les da opciones para su formación profesional”, en un colegio rural de Antioquia.
- “Un estudiante me dijo ‘Profe, dio la clase mejor que usted’”
- “Estoy segura de que será una experiencia inolvidable para los chicos”

Claramente, la visita de los divulgadores de astronomía representó una experiencia significativa de aprendizaje. Por sí solo, esto puede pensarse como un resultado positivo. Sin embargo, estos resultados muestran que se está comparando la estrategia de la simulación con una estrategia de divulgación con experto, diferente a una clase tradicional.

Sobre la experiencia con los divulgadores, se resalta la importancia de hacer divulgación en las aulas, especialmente en las comunidades rurales o de municipios alejados del país, donde este tipo de interacciones son escasas

9. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones principales del trabajo, sobre las cuales se profundizará más adelante:

- Se logró diseñar, desarrollar y desplegar en la web un conjunto de 12 simulaciones interactivas para enseñar astronomía y astrofísica. Con la simulación de *Evolución Estelar* se diseñó una secuencia didáctica de aprendizaje por indagación y un inventario de conceptos para evaluar conocimientos.
- Se considera que la mejor herramienta para desarrollar estas simulaciones es JavaScript, usando librerías como P5 y WebGL. La misma tecnología es usada por la página web de simulaciones PhET. Para el despliegue se recomienda usar GitHub Pages.
- Las herramientas creadas fueron bien recibidas por las comunidades educativas. Queda como trabajo futuro el diseñar secuencias didácticas para el resto de simulaciones y evaluar su impacto. Uno de los maestros involucrados creó su propia secuencia didáctica de la simulación *Movimientos del Sol* y la aplicó en su institución (Ver anexo E).
- La secuencia didáctica de *Simulación Estelar* permitió a los docentes, incluso sin capacitación previa en el tema, llevar a cabo una clase con simulación y obtener resultados óptimos. Ligeramente mejores que una clase con un divulgador de astronomía invitado.
- Las clases con divulgadores fueron recibidas por los estudiantes como experiencias altamente significativas. Como consecuencia, ya no puede considerarse como prueba de control, pero habla de la importancia de estas intervenciones.

Este trabajo fue un recorrido Ciencia-Tecnología-Sociedad por el mundo de las simulaciones interactivas. Se eligieron algunas temáticas astrofísicas según los vacíos conceptuales identificados por la literatura, y qué tanto representan un reto para la enseñanza. Alrededor de estas temáticas, se desarrollaron soluciones tecnológicas en forma de simulaciones interactivas en JavaScript, de las cuáles 12 de ellas se publicaron en internet²⁶. Finalmente, se construyó una secuencia didáctica, basada en aprendizaje por indagación, con la simulación de *Evolución Estelar*; esta secuencia se aplicó a estudiantes de bachillerato de Colombia y Latinoamérica, y se evaluó el aprendizaje a través de un inventario de conceptos, aplicado antes y después de la intervención didáctica. Además, se compararon los resultados con grupos donde la clase fue dictada por estudiantes divulgadores del pregrado de astronomía de la Universidad de Antioquia.

Se pudo evidenciar una ganancia en el aprendizaje sobre evolución estelar con todos los estudiantes evaluados (N=186). La clase con la simulación (N=97), guiada por los docentes, que no contaban con experiencia en el tema de evolución estelar, reportó un puntaje ligeramente mayor al obtenido por la clase con divulgadores expertos (N=89). Esto quiere decir que, bajo el criterio de la prueba de conocimientos construida en este proyecto, la clase de aprendizaje por indagación con la simulación de evolución estelar es igual de efectiva para generar aprendizaje, si no mejor, que una clase con divulgadores de astronomía.

²⁶ <https://agustinvallejo.github.io/games.html>

La participación de divulgadores de astronomía para dirigir la clase “control” introdujo sesgos inesperados. Para los estudiantes, la visita de los divulgadores significó tener una clase distinta a lo usual, generando incluso experiencias significativas de aprendizaje. Para muchos, el poder interactuar con un astrónomo en formación significó un evento de mucha relevancia. De aquí se destacan dos puntos: primero, la importancia de continuar haciendo este tipo de actividades, e involucrar más a la academia en procesos educativos escolares; los docentes y estudiantes lo valoran mucho. Segundo, que incluso para los casos en los que no es posible llevar un divulgador de astronomía, la simulación de *Evolución Estelar* demostró haber estado a la altura del reto. Es decir, el uso de estas simulaciones puede significar, al menos en nivel de ganancia de aprendizaje, lo mismo que tener un astrónomo de bolsillo, disponible en cualquier momento y lugar, para cualquier institución con acceso a internet, y sin necesidad de una preparación extensa por parte del maestro o maestra.

Respecto a la secuencia didáctica en sí, se puede pensar en actualizarla un poco en función de la retroalimentación de los estudiantes y docentes: en primer lugar, ha de reducirse en contenido, ya que era muy extensa, y en muchos casos ni siquiera se alcanzó a terminar (haciendo más notable aún el resultado de la simulación en la prueba). Luego, vendría bien contextualizar mejor a los estudiantes sobre el concepto de “nacimiento” o “muerte” cuando se habla de una estrella. Muchos de ellos escribieron en su guía que las estrellas más duraderas eran las azules, ya que se convertían en agujeros negros y estos demoraban mucho en morir; esa concepción no es errónea en sí, ya que la idea de que la estrella azul muere para dar lugar al agujero negro es sumamente subjetiva e influenciada por el vocabulario que se usa en la ciencia. Viene al caso la pregunta de ¿Cómo muere una estrella si nunca estuvo viva en primer lugar?

La simulación de *Evolución Estelar* también podría ser expandida a futuro. Algunas sugerencias e ideas fueron en este caso: Ser más explícito con el hecho de que las estrellas se forman en el colapso de una nube de polvo, y quizá no incluir tanto texto en la pantalla. Dándole más fuerza a la parte de aprendizaje por indagación, puede pensarse en que la información física de cada estrella se muestre solo cuando el usuario haga clic en ella, e incluso se podría mostrar una vista detallada de dicho cuerpo celeste y los procesos nucleares que ocurren en su interior. Así, se podría también cubrir el tema de la composición y el funcionamiento de las estrellas, y a su vez contar con inventarios de conceptos más ricos, que abarquen más contenido evaluado. Adicionalmente, es importante repensar la forma de mostrar las estrellas, ya que las que eran muy brillantes, aunque tenían un aura azul, eran percibidas como gigantes blancas.

Frente a las otras 11 simulaciones disponibles en el sitio web, también hay mucho espacio para mejoras: En primer lugar, varias de las simulaciones podrían seguir recibiendo rediseños, para cambiar los gráficos iniciales por figuras más llamativas y mejor pensadas. También, la herramienta por sí sola no asegura un aprendizaje sin el debido acompañamiento. Habría que diseñar secuencias didácticas para cada una, basadas en metodologías de aprendizaje por indagación.

Ese trabajo futuro podría facilitarse al colaborar con las comunidades educativas. Por ejemplo, para la simulación de *Movimientos del Sol*, un profesor de escuela escribió su propia secuencia didáctica de manera independiente para aplicar con sus estudiantes, generosamente la compartió con nosotros (ver anexo E). Este tipo de interacción con los docentes interesados es supremamente valiosa para el proyecto, y es lo que también permite que la comunidad de PhET siga creciendo, con maestros y maestras aportando actividades a las simulaciones.

Respecto al proceso del desarrollo del software, se concluye que la tecnología predilecta para la creación de simulaciones es el lenguaje de programación JavaScript. Es de los lenguajes más usados en el mundo, y por ende existe una amplia documentación. Además, es el lenguaje del desarrollo web, permitiendo así que las simulaciones se compartieran en internet. Si se complementa con librerías de visualización como P5 y WebGL puede llegar a ser una herramienta muy poderosa. Es también el lenguaje de programación oficial de PhET.

Pensando en la posibilidad de seguir agregando contenido al sitio web, sería necesario implementar módulos comunes, que permitan a las simulaciones remitirse al mismo punto para la lógica que es compartida entre todas, como los botones, las estrellas, y algunas funcionalidades como arrastrar y soltar. La estructura de PhET y Godot (Ver sección 4.1.3) está basada en programación orientada a objetos, y usan sistemas de jerarquías y herencias. Es necesario estudiar más a fondo la forma de implementar estas arquitecturas en las simulaciones del proyecto.

La educación en astronomía precisa de soluciones innovadoras, que abarquen temas difíciles e ignorados, que puedan facilitar a los alumnos conectar con ideas científicas, invitándolos a pensar e indagar. El presente trabajo fue un intento de abordar dicha necesidad. Se espera que el contenido de estas líneas pueda motivar a futuros astrónomos, desarrolladores o docentes para sumarse a este proyecto o incluso crear sus propias herramientas educativas. Esperamos que los productos finales de esta investigación puedan tener un impacto en esas aulas a las que, de otra forma, quizá nunca hubiera llegado la astronomía.

10. Referencias bibliográficas

- Allen, M. J., & Yen, W. M. (2001). *Introduction to measurement theory*. Waveland Press.
- Arias de Greiff, J. (1987). *Historia de la astronomía en Colombia*.
- Bailey, J. M. (2011). *Astronomy education research: Developmental history of the field and summary of the literature*. Commissioned paper for the National Research Council Board on Science Education's Committee on the Status, Contributions, and Future Directions of Discipline Based Education Research.
- Bailey, J. M., Johnson, B., Prather, E. E., & Slater, T. F. (2012). Development and validation of the star properties concept inventory. *International Journal of Science Education*, 34(14), 2257-2286.
- Barringer, D. F., Plummer, J. D., Kregenow, J., & Palma, C. (2018). Gamified approach to teaching introductory astronomy online. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010140.
- Bertram, L. (2020). Digital Learning Games for Mathematics and Computer Science Education: The Need for Preregistered RCTs, Standardized Methodology, and Advanced Technology. *Frontiers in Psychology*, 11, 2127.
- Bretones, P. S., & Neto, J. M. (2011). An analysis of papers on astronomy education in proceedings of IAU meetings from 1988 to 2006. *Astronomy Education Review*, 10(1).
- Clark, D., Nelson, B., Sengupta, P., & D'Angelo, C. (2009, October). Rethinking science learning through digital games and simulations: Genres, examples, and evidence. In *Learning science: Computer games, simulations, and education workshop sponsored by the National Academy of Sciences*, Washington, DC.
- Deslauriers, L., McCarty, L. S., Miller, K., Callaghan, K., & Kestin, G. (2019). Measuring actual learning versus feeling of learning in response to being actively engaged in the classroom. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(39), 19251-19257.
- Dubois, C., Eckardt, R., & Schmullius, C. (2022, April). Blended-learning educational concept for earth observation at university level. In *4th Symposium on Space Educational Activities*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Falloon, G. (2019). Using simulations to teach young students science concepts: An Experiential Learning theoretical analysis. *Computers & Education*, 135, 138-159.
- Fraknoi, A. (2014). A brief history of publishing papers on astronomy education research. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 1(1), 37-40.
- Gonzalez Vivo, P., & Lowe, J. (2015). *The book of shaders*.
- González Murillo, G. F. (2016). *Conceptos y principios básicos de la astronomía observacional. Propuesta didáctica complementada con la utilización de tic, dirigida a estudiantes de educación media vocacional*. Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales.
- Grass, M., Maheswaran, T., & Detrell Domingo, G. (2022, April). The space station design workshop goes digital-opportunities and challenges during pandemic-times. In *4th Symposium on Space Educational Activities*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American journal of Physics*, 66(1), 64-74.
- Haladyna, T. M., Downing, S. M., & Rodriguez, M. C. (2002). A review of multiple-choice item-writing guidelines for classroom assessment. *Applied measurement in education*, 15(3), 309-333.
- Hoff, D. B. (1990). History of the teaching of astronomy in American high schools. In *International Astronomical Union Colloquium (Vol. 105, pp. 249-253)*. Cambridge University Press.

- Holmes, N. G., Wieman, C. E., & Bonn, D. (2015). Teaching critical thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(36), 11199-11204.
- Honey, M. A., & Hilton, M. L. (2011). *Learning science through computer games*. National Academies Press, Washington, DC.
- Ibáñez, M., Estrada Roca, M. A., & Barbero Sola, I. (2017). Herramientas virtuales de simulación en la enseñanza de la astronomía diurna en futuros maestros de Primaria. *EDUTEC-Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 2017, num. 59, p. 1-14.
- Laskey, L. (2022, April). Space games: evaluating game-based virtual reality in higher education. In 4th Symposium on Space Educational Activities. Universitat Politècnica de Catalunya.
- López (2020) Implementación de una estrategia activa complementada con TIC para enseñanza de circuitos eléctricos en bachillerato
- Mayoral, O., Solbes, J., Cantó, J., & Pina, T. (2020). What has been thought and taught on the lunar influence on plants in agriculture? perspective from physics and biology. *Agronomy*, 10(7), 955.
- Navarrete Flórez, D. S., & Valderrama, D. A. (2020). Apropiación conceptual de la astronomía en el contexto de la educación primaria.
- Papastergiou, M. (2009). Digital game-based learning in high school computer science education: Impact on educational effectiveness and student motivation. *Computers & education*, 52(1), 1-12.
- Perkins, K., Adams, W., Dubson, M., Finkelstein, N., Reid, S., Wieman, C., & LeMaster, R. (2006). PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. *The physics teacher*, 44(1), 18-23
- Peña Parra, J. C. (2013). Uso didáctico de recursos tic y software libre en la enseñanza de la observación lunar. *Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales*.
- Ruiz-Reyes, J. S. (2010). La ciencia sublime: historia cultural de la divulgación de la astronomía en Colombia, siglo XIX e inicios del XX. *Memoria y Sociedad*, 165-166.
- Rodríguez Henao, J. A., & Díaz Álvarez, L. F. (2016). Herramienta didáctica para la enseñanza de los principios básicos de astronomía a niños mediante realidad aumentada (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena).
- Salpeter, E. E. (1955). The luminosity function and stellar evolution. *The Astrophysical Journal*, 121, 161.
- Sarmiento Borda, J. G., & Angulo Cohen, E. H. (2015). Diseño e implementación de una herramienta didáctica para la enseñanza de los principios de astronomía a niños mediante realidad aumentada, en la fundación colegio cristiano de Cartagena.
- Schmidt, Q. (2006). Estándares básicos de competencias en lenguaje, matemáticas, ciencias y ciudadanas: guía sobre lo que los estudiantes deben saber y saber hacer con lo que aprenden.
- Sepúlveda-Soto, A. (2014) *Bases de Astrofísica*. Editorial Universidad de Antioquia.
- Shiffman, D., Fry, S., & Marsh, Z. (2012). The nature of code. D. Shiffman.
- Sierra Sáenz, Y., & León Ibagón, J. F. (2016) *Aplicación para Dispositivos Móviles que Ayude a Fortalecer los Conocimientos de Astronomía en Niños de 8 Años*.
- Slater, S. J., Schleigh, S. P., & Stork, D. J. (2015). Analysis of individual test of astronomy standards (TOAST) item responses. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 2(2), 89-108.
- Stefko, M., Shiyi, L., Luck, M., & Hajnsek, I. (2022, April). SAR²-An augmented-reality App for exploration of principles of synthetic aperture radar. In 4th Symposium on Space Educational Activities. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Susman, K., & Pavlin, J. (2020). Improvements in Teachers' Knowledge and Understanding of Basic Astronomy Concepts through Didactic Games. *Journal of Baltic Science Education*, 19(6), 1020-1033.
- Tatum, J. B., (2022) *Celestial Mechanics*. Phys Libretexts.
- Van Eck, R. (2006). Digital game-based learning: It's not just the digital natives who are restless. *EDUCAUSE review*, 41(2), 16.
- Wieman, C. E. (2014). Large-scale comparison of science teaching methods sends clear message. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8319-8320.

Apéndices

A - Secuencia Didáctica

Laboratorio de Evolución Estelar

Guía de Simulación Interactiva

https://agustinvallejo.github.io/games/laboratorio_estelar/main.html

Objetivos de Aprendizaje

- Observar que las estrellas también tienen procesos de formación, evolución y destrucción.
- Reconocer las características como masa, temperatura, tamaño y color que diferencian a las estrellas.
- Diferenciar las estrellas según su estado evolutivo e identificar cuáles son las estrellas más comunes .
- Identificar los diferentes cuerpos celestes asociados a los procesos de evolución estelar.



Secuencia Didáctica

Ideas Iniciales

1. Alguna vez en una noche despejada has visto el cielo plagado de estrellas. ¿Son todas las estrellas que ves en el cielo iguales entre sí? ¿se ven del mismo color? ¿del mismo tamaño? Discute esto con tu grupo en voz alta.
2. ¿Crees que esas estrellas siempre han estado y estarán allí? ¿o como los humanos, en algún momento morirán y nacerán otras? Discute con tu grupo.

Recolección de datos

3. Explora la simulación por 5 minutos. Manipula los distintos botones y descubre sobre qué se trata y cómo funciona. Escribe abajo de qué crees que se trata la simulación y las cosas que más te llamaron la atención.

| |
|--|
| |
|--|


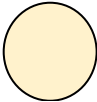
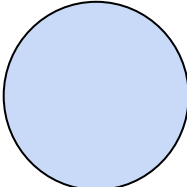
4. Sigue uno de los puntos de la simulación desde que aparece. Obsérvala durante x cantidad de tiempo. ¿Qué sucede? ¿desaparece en algún momento? ¿qué crees que significa esto?

| |
|--|
| |
|--|

5. Activando las etiquetas ¿Qué tipos de estrellas puedes reconocer?

| |
|--|
| |
|--|

6. Crea una estrella. Dibuja su evolución y registra el tamaño, el color y la edad en la tabla.

| Momento Inicial | Antes de Morir | Resultado ¿Cómo muere? |
|--|---|---|
| Tamaño: Pequeña Color: Roja Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Mediana Color: Amarilla o blanca Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Grande Color: Azul Edad: 0 Observaciones/dibujo:  | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: | Tamaño: Color: Edad: Observaciones/dibujo: |

7. Marca con una X las diferencias que encuentres entre las estrellas de la simulación:

| | Estrellas Rojas | Estrellas Azules |
|--|-----------------|------------------|
| ¿Cuáles aparecen con más frecuencia al hacer clic? | _____ | _____ |
| ¿Cuáles duran más tiempo en pantalla? | _____ | _____ |

8. Activando las etiquetas, extrae la información sobre al menos 10 estrellas en apariencia distintas. Escribe tus datos en la tabla.

| Tipo de estrella | Masa (Msol) | Color | ¿Qué tanto tarda en desaparecer? |
|------------------|-------------|-------|----------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

- 8.1. ¿Qué relaciones encuentras entre los datos registrados anteriormente?

| |
|--|
| |
|--|

Conclusiones

9. Realiza una discusión con tu grupo retomando las preguntas de las ideas iniciales y respondan nuevamente. ¿Cambió en algo sus respuestas? Discute esto con tu grupo en voz alta y luego responde:
- 9.1. ¿Son todas las estrellas que ves en el cielo iguales entre sí?
 - 9.2. ¿Son del mismo color?
 - 9.3. ¿Son del mismo tamaño?
10. ¿Cuáles son las características de las estrellas más comunes en el universo?
11. ¿Qué le pasa a una estrella al final de su vida según su tamaño?
12. ¿Cómo son las características de las estrellas que viven menos tiempo?

B - Inventario de Conceptos

1. ¿Todas las estrellas son iguales entre sí?
 - a. Sí, todas son iguales
 - b. No, son diferentes
2. ¿Todas las estrellas del cielo son del mismo color?
 - a. Sí, todas tienen el mismo color
 - b. No, el color varía de estrella a estrella
3. ¿Todas tienen el mismo tamaño?
 - a. Sí, todas son aproximadamente del mismo tamaño
 - b. No, todas tienen tamaños variables
4. ¿Cuál de los siguientes objetos es el más masivo?
 - a. Gigante roja
 - b. Enana blanca
 - c. El sol
 - d. Estos objetos podrían tener masas similares
5. Las estrellas comienzan su vida como
 - a. Un trozo de otra estrella
 - b. Un planeta
 - c. Una enana blanca
 - d. Una nube de gas y polvo
 - e. Material en la atmósfera de la tierra
6. ¿Cómo se relaciona el tiempo de vida de una estrella con su masa?
 - a. Las estrellas más masivas viven mucho más tiempo que las menos masivas.
 - b. Las estrellas más masivas viven mucho menos tiempo que las menos masivas.
 - c. Las estrellas más masivas viven ligeramente más tiempo que las menos masivas.
 - d. Las estrellas más masivas viven ligeramente menos tiempo que las menos masivas.
 - e. Todas las estrellas tienen el mismo tiempo de vida
7. ¿Cuál de las siguientes estrellas vivirá más
 - a. Estrella roja y pequeña
 - b. Estrella mediana y amarilla
 - c. Estrella gigante y azul
8. Una estrella que nace como supergigante azul se convertirá al final de su vida en:
 - a. Agujero negro
 - b. Estrella de neutrones
 - c. Nebulosa
 - d. Enana blanca
 - e. Ninguna de las anteriores
9. Podemos afirmar que la mayoría de las estrellas en el universo son
 - a. Pequeñas y rojas
 - b. Medianas y amarillas
 - c. Grandes y azules
 - d. No hay un tipo de estrella más común
10. ¿Qué le pasará al Sol al final de su vida (puede seleccionar varias)
 - a. Explotará como una supernova
 - b. Se inflará como una gigante roja
 - c. Se convertirá en agujero negro
 - d. Se convertirá en enana blanca
 - e. El Sol nunca va a morir

C - Poster SSEA 2022



Implementation of interactive digital tools for Astronomy education

Agustín Vallejo-Villegas, Pablo Cuartas-Restrepo
Universidad de Antioquia, Colombia
agustin.vallejo@udea.edu.co
pablo.cuartas@udea.edu.co



Development:

p5.js



All done with open access software!

Deployment:



GitHub Pages

SIMULATIONS:

- Basic Astronomy
 - Telescopes & Coordinates
 - Solar System Models
 - Eclipses and Tides
- Light & Spectra
- Orbital Mechanics
- Stellar Evolution

DESIGN CONSIDERATIONS:

- Choose clear **learning goals** to build upon.
- Use the simulations to tackle **misconceptions**.
- Focus on a **specific phenomena** and think about the ways it can be shown, understood, and misunderstood.
- **Realism** is not always necessary. It's the teacher's task to land the concept, and to discuss the model's **inaccuracies**.
- **Descriptive buttons** often help guide the user.

ACTIVITIES GUIDELINES:

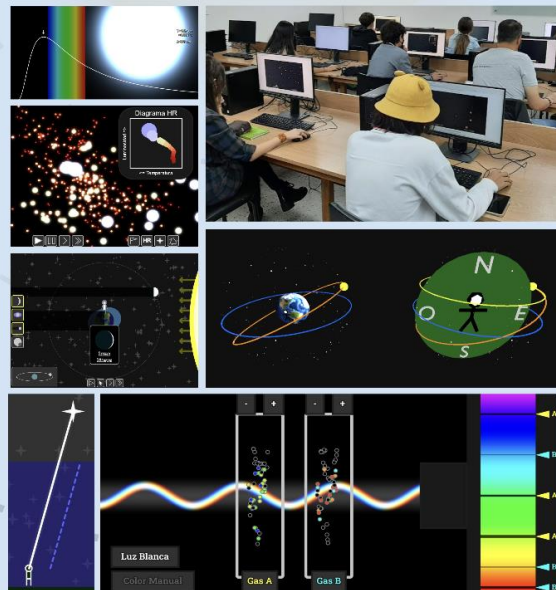
1. Identify students' **preconceptions**.
2. Let them **explore** the simulation on their own, guiding them to experiencing the phenomena.
3. Ask them to formulate **hypotheses**, make measurements, and register data.
4. **Discuss** afterwards: formulate a model based on observations.

FUTURE WORK:

- Further classroom research and feedback
- Solar System simulation with PhET
- More activities on their way!



GALLERY:



PhET
INTERACTIVE SIMULATIONS



ORGANISERS:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH



Generalitat de Catalunya ICCUB

4th Symposium on Space Educational Activities
April 27th, 28th, 29th 2022 - Barcelona, Spain

D - Respuestas de la secuencia didáctica

A continuación, se recopilan algunos escaneos de las guías de trabajo llenadas por los estudiantes:

Recolección de datos

3. Explora la simulación por 5 minutos. Manipula los distintos botones y descubre sobre qué se trata y cómo funciona. Escribe abajo de qué crees que se trata la simulación y las cosas que más te llamaron la atención.

Me llamo mucho la atención como aparecen otras estrellas a través de una gigante. Pude ver la duración de ellas y notar las diferencias entre ellas.

4. Sigue uno de los puntos de la simulación desde que aparece. Obsérvala durante x cantidad de tiempo. ¿Qué sucede? ¿desaparece en algún momento? ¿qué crees que significa esto?

La mayoría de estrellas desaparecen en determinado tiempo, primero las más grandes, las que no tienen tiempo definido son los agujeros negros y las estrellas de los neutrones.

5. Activando las etiquetas ¿Qué tipos de estrellas puedes reconocer?

enanas blancas, enanas rojas, gigantes azules, estrellas de neutrones, enanas amarillas, gigantes rojas.

6. Crea una estrella. Dibuja su evolución y registra el tamaño, el color y la edad en la tabla.

Figura 41

7. Marca con una X las diferencias que encuentres entre las estrellas de la simulación:

| | Estrellas Rojas | Estrellas Azules |
|--|-----------------|------------------|
| ¿Cuáles aparecen con más frecuencia al hacer clic? | X | — |
| ¿Cuáles duran más tiempo en pantalla? | X | — |

8. Activando las etiquetas, extrae la información sobre al menos 10 estrellas en apariencia distintas. Escribe tus datos en la tabla.

| Tipo de estrella | Masa (Msol) | Color | ¿Qué tanto tarda en desaparecer? desaparece rápido, |
|------------------|-------------|----------|---|
| G. Roja | 0.761 | roja | 30 mil millones |
| E. Neutrones | 10.17 | Blanca | se puede decir que infinita |
| E. Roja | 0.62 | roja | 7 mil millones |
| E. amarilla | 0.9 | amarilla | 1 mil millones |

Figura 42

Recolección de datos

3. Explora la simulación por 5 minutos. Manipula los distintos botones y descubre sobre qué se trata y cómo funciona. Escribe abajo de qué crees que se trata la simulación y las cosas que más te llamaron la atención.

Creo que la simulación trata sobre la evolución de las estrellas, de donde salen, su duración, su muerte y lo que pasa después.

4. Sigue uno de los puntos de la simulación desde que aparece. Obsérvala durante x cantidad de tiempo. ¿Qué sucede? ¿desaparece en algún momento? ¿qué crees que significa esto?

Seguí una gigante azul, duran aproximadamente 3 mil millones de años y pueden convertirse en agujeros negros o estrellas de Neutrones.

5. Activando las etiquetas ¿Qué tipos de estrellas puedes reconocer?

Gigantes azules, estrella de neutrones, enanas rojas, enanas amarillas, gigantes rojas, enanas blancas

Figura 43

8. Activando las etiquetas, extrae la información sobre al menos 10 estrellas en apariencia distintas. Escribe tus datos en la tabla.

| Tipo de estrella | Masa (Msol) | Color | ¿Qué tanto tarda en desaparecer? desaparece rápido, |
|-----------------------|-------------|----------|--|
| Gigante Azul | 8.30 Msol | Azul | Rápido 1 mil millones años |
| Gigante Roja | 0.7 Msol | Roja | 16 mil millones años |
| Enana amarilla | 0.17 Msol | Amarilla | 7 mil millones |
| Estrella de neutrones | 18.25 Msol | Blanca | indeterminado |

Figura 44

| Momento Inicial | Antes de Morir | Resultado ¿Cómo muere? |
|---|---|---|
| Tamaño: Pequeña Color: Roja Edad: 0 Observaciones/dibujo: | Tamaño: Gigante Color: Roja Edad: 24-28 mil millones de años Observaciones/dibujo: | Tamaño: Gigante Color: Roja Edad: 28 mil millones de años Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Mediana Color: Amarilla o blanca Edad: 0 Observaciones/dibujo: | Tamaño: Gigante Color: Roja Edad: 10 mil millones de años Observaciones/dibujo: | Tamaño: Gigante Color: Roja Edad: 12 mil millones de años Observaciones/dibujo: |
| Tamaño: Grande Color: Azul Edad: 0 Observaciones/dibujo: | Tamaño: Gigante Color: Azul Edad: 3 mil millones de años Observaciones/dibujo: | Tamaño: Mediana Color: Blanca Edad: Infinito Observaciones/dibujo: Estrella de neutrones |

7. Marca con una X las diferencias que encuentres entre las estrellas de la simulación:

| | Estrellas Rojas | Estrellas Azules |
|--|-----------------|------------------|
| ¿Cuáles aparecen con más frecuencia al hacer clic? | <u>X</u> | — |
| ¿Cuáles duran más tiempo en pantalla? | <u>X</u> | — |

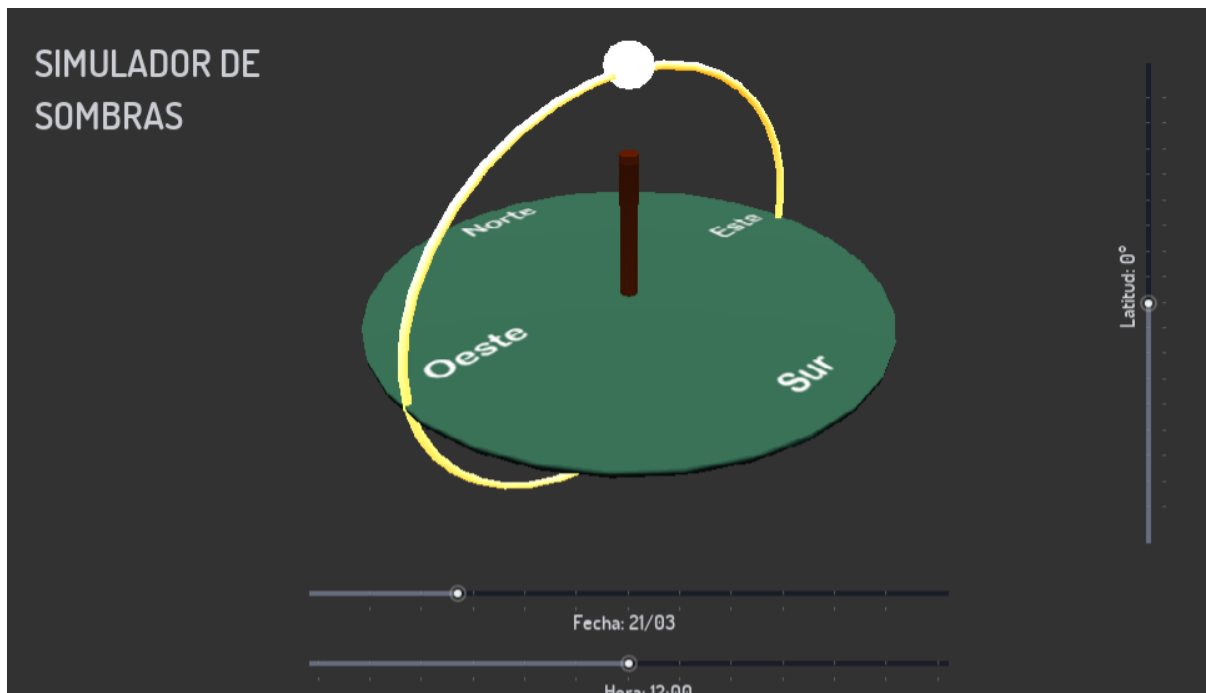
8. Activando las etiquetas, extrae la información sobre al menos 10 estrellas en apariencia distintas. Escribe tus datos en la tabla.

| Tipo de estrella | Masa (Msol) | Color | ¿Qué tanto tarda en desaparecer? desaparece rápido, |
|------------------|-------------|----------|--|
| Enana amarilla | 0.9 Msol | Amarillo | 7 mil millones de años |
| Enana Roja | 0.76 Msol | Roja | 20 mil millones de años |
| Gigante Roja | 0.55 Msol | Roja | 40 mil millones de años |
| Gigante Azul | 10.32 | Azul | 2 mil millones de años / Rapido |

Figura 45

E - Secuencia Didáctica de Movimientos del Sol

La siguiente secuencia didáctica fue realizada y aplicada por el profesor Jaime Álvarez, de la Escuela Normal Superior Distrital María Montessori.



Objetivo: Identificar el movimiento del Sol y su relación con los cambios estacionales en el planeta.

Material: Una botella, brújula, cuaderno, colores, transportador y simulador <https://agustinvallejo.github.io/games/analema/index.html>

1. **Observación inicial:** ubicar en el patio del colegio o de tu casa una botella y una brújula, observar hacia donde se dirige la sombra y mide el tamaño de la sombra. Escribir esta información en el cuaderno.

2. **Hipótesis:** antes de usar el simulador y sin buscar en libros o internet, responde las siguientes preguntas.

Tomando en cuenta la fecha, en la que tomamos la información de la sombra de la botella:

- ¿Crees que el tamaño de la sombra y la dirección de la sombra cambiará si se toma en el mismo lugar y hora, en un mes, en dos meses y seis meses? Argumentar.
- ¿Por qué crees que cambia el tamaño de la sombra? Argumentar.
- ¿Si hacemos este ejercicio en otra parte del mundo, por ejemplo, en Nueva York o en Lima tendríamos el mismo resultado, respecto a la dirección y tamaño de la sombra?
- Escribir otras preguntas que se te ocurran de la observación.

3. **USO DEL EXPLORADOR:**

- Observación: Explorar el simulador, identificar cómo funciona y que trata de explicar.
- Buscar en internet la latitud en la que se encuentra la ciudad de Bogotá.
- Poner en el simulador la latitud, la fecha y la hora en la que tomamos la observación en el patio y comparar la información con la que ofrece el simulador. ¿Existen diferencias y similitudes respecto a la información que ofrece el simulador y lo que observamos en el patio?

- d. Ubicar la latitud de Nueva York y Santiago de Chile y comparar la sombra con la ubicación de Bogotá. ¿Se percibe la posición del sol de la misma forma en las dos ciudades?
- e. Ubiquemos de nuevo en Bogotá y cambiemos la fecha y ubiquemos en el 21 de marzo, 21 de junio, 21 de septiembre y 21 de diciembre. Observemos como cambia la sombra. ¿Qué cambio estacional ocurrió en Bogotá en estas fechas?
- f. Ubiquemos las mismas fechas en la ciudad de New York. ¿Qué diferencias y similitudes con respecto a la sombra que se proyecta en Bogotá? ¿Qué cambio estacional ocurre en esta ciudad en estas fechas?
- g. Ubiquemos las mismas fechas en la ciudad de Santiago de Chile. ¿Qué diferencias y similitudes con respecto a la sombra que se proyecta en Bogotá? ¿Qué cambio estacional ocurre en esta ciudad en estas fechas?
- h. Comparar las sombras de Santiago de Chile y New York, ¿Qué similitudes y diferencias hay?
- i. ¿Por qué son diferentes las estaciones en las tres ciudades en la misma fecha?