

# La Física en la formación de los biólogos. Balance crítico de una experiencia de cinco años en un grado en Biología



Armando del Romero<sup>1</sup>, Miguel Sancho<sup>2</sup> y Paula Ortiz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física y Matemáticas. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.

<sup>2</sup>Departamento de Física Aplicada III. Universidad Complutense de Madrid, España.

<sup>3</sup>Grado en Biología Sanitaria (estudiante de 4º curso). Universidad de Alcalá, España.

**E-mail:** armando.delromero@uah.es

(Recibido el 20 de junio de 2017; aceptado el 5 de enero de 2018)

## Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar y analizar los resultados de una experiencia de enseñanza-aprendizaje en la asignatura de Física del primer curso de un grado en Biología impartido en una universidad pública española. Partiendo de una discusión sobre el diseño inicial, que fue evolucionando a lo largo de cinco años, realizamos una lectura crítica de lo que se logró, de lo que no se logró y de sus causas. Reflexionamos finalmente sobre la posible utilidad de las lecciones aprendidas, positivas y negativas, para otros grados o licenciaturas en Biología. Contextualizamos nuestro análisis en el debate actual sobre la formación que necesitan los futuros biólogos, que en los Estados Unidos está siendo especialmente intenso y organizado. En ese marco, nos preguntamos cuál debería ser el propósito último del “curso introductorio de física” incluido en el plan de estudios de la mayoría de los grados en Ciencias de la Vida y aportamos evidencias sobre la pertinencia de la estrategia pedagógica elegida para lograr ese propósito: de la biología a la física (*top-to-down*). La combinación de dicha estrategia con un sistema de evaluación continua que iba reflejando el progreso de los alumnos se mostró efectiva para superar los dos retos principales de la asignatura: minimizar el abandono y estimular en ellos el importante esfuerzo necesario para lograr los objetivos de aprendizaje. El análisis sugiere también vías para la posible superación de las dificultades encontradas, la mayoría de ellas accesibles a cualquier profesor con el único apoyo de su Departamento.

**Palabras clave:** Física en grados universitarios en biología, formación de los biólogos, enseñanza de la física.

## Summary

The goal of this paper is to show and analyse the results of a teaching and learning experience in the introductory Physics course for a Biology degree in a Spanish public university. Starting from a discussion about the initial design of the course that was evolving along five years, we make a critical reading of what was achieved and what was not and about its causes. Finally, we ponder over the potential usefulness of positive and negative learned lessons for other Biology degrees. We contextualize our analysis in the ongoing debate on the education and training needed by future biologists, which is being specially intense and organized in the United States. In this context we wonder what the main purpose of the introductory physics course of most Life Sciences degrees curricula should be and we provide evidence on the adequacy of the chosen pedagogical strategy to achieve this goal, i.e. from biology to physics (*top-to-down*). The combination of the above approach with a system of continuous assessment reflecting the students' progress, was shown to be effective for overcoming the two main student challenges in the course i.e. to minimise withdrawal and to stimulate effort in order to reach the learning objectives for the course. The analysis also suggests ways to try to overcome the current difficulties, most of them accessible to any teacher with the only support of his Department.

**Keywords:** Physics courses in Biology degrees, biologist's education, Physics teaching.

PACS: 01.40.-d, 01.40.G, 0140.gb.

ISSN 1870-9095

## I. INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ FÍSICA NECESITAN LOS FUTUROS BIÓLOGOS?

This convergence of advances in biology and the science of learning comes at a time when the nation, indeed the world, is faced with large and urgent challenges, from global climate change and energy, to food production and health care, all of

which connect to research, study and policies that touch on the biological sciences [1]. Given the radical changes in the nature of the science of biology and what we have learned about effective ways to teach, this is an opportune time to address the biology we teach so that it better represents the biology we do [3].

Estas frases resumen el espíritu y el principal propósito del proyecto *Vision and Change in Undergraduate Biology Education*, (*Vision and Change*, en adelante), impulsado en

los EEUU durante la pasada década, en el marco de un profundo proceso de reforma de sus majors in Life Sciences promovido y liderado por The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, The American Association for the Advancement of Science y The National Science Foundation. Dicho proyecto logró consensuar, entre los numerosos actores involucrados, una hoja de ruta que implica transformar profundamente la docencia que se imparte en sus *bachelors* en Biología, tanto en contenidos como en metodologías docentes, con el principal propósito de que los estudiantes finalicen su grado comprendiendo “la naturaleza interdisciplinar de la nueva biología”. Sus recomendaciones fueron publicadas en 2009 [1] y 2011 [2]. Todas sus actividades e informes, incluyendo un plan de acompañamiento para alentar y difundir la implementación de las propuestas consensuadas pueden encontrarse y seguirse en su web [3]. Respondiendo a esa llamada a la acción -a biólogos, físicos, químicos, matemáticos, educadores y autoridades universitarias- los físicos estadounidenses iniciaron, a finales de la pasada década, un proceso de reflexión y debate que está produciendo una reforma de la física que se ofrece en sus carreras de ciencias de la vida, en especial de los Introductory Physics Life Sciences (IPLS). La esencia de esa reforma consiste en adecuar la asignatura a los objetivos de aprendizaje consensuados en el citado proyecto *Vision and Change* para los *bachelors* en biología. La mayoría de sus propuestas y experiencias están publicadas en tres revistas -*American Journal of Physics*, *Physics Education* y *CBE-Life Sciences Education*- y en las actas de los congresos organizados regularmente por *The American Physical Society (APS)* y por *The American Association of Physics Teachers (AAPT)*, donde el asunto aparece con frecuencia desde 2009. El informe final de la *Conference on Introductory Physics for the Life Sciences* [4], difundido en 2015, anexa una relación ordenada de las numerosas publicaciones hasta esa fecha. En el EEES no se ha producido aún un consenso similar que pudiera orientar sobre la física básica que necesitan los futuros biólogos europeos. Tampoco lo hemos encontrado en Iberoamérica. Esa carencia catalizaría en España (2015) el proyecto *Introductory Physics Life Sciences for BSc Biology in Spain (IPLS-Spain)* con el propósito último de alentar ese debate entre físicos, biólogos y educadores. Su primer fruto consistió en una propuesta de asignaturas de física para los grados españoles en Biología publicada en 2017, simultáneamente, en las revistas de dos sociedades científicas españolas, la de Física (RSEF) y la de Bioquímica y Biología Molecular (SEBBM) [5]. En ella se señala que *en los debates del equipo se tuvo muy en cuenta la experiencia docente de la asignatura Física en el grado en Biología Sanitaria de la Universidad de Alcalá (Física BIOSAN) a lo largo de cinco cursos (2010-11 a 2014-15), anunciando una próxima publicación de un balance crítico*. Esta reflexión crítica es la que presentamos aquí. No obstante, una breve reflexión sobre esa experiencia fue presentada al 27°.

Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física (Santiago de Compostela, julio 2017), en el marco de la XXXVI Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física [6]. ¿Con qué criterios se diseñó la asignatura? ¿Cómo fueron evolucionando sus resultados y en qué medida indican que el diseño y el enfoque pedagógico eran adecuados? ¿Qué circunstancias

favorecieron y cuáles dificultaron el logro de los objetivos de aprendizaje? Las lecciones aprendidas en esa experiencia, positivas y negativas, ¿podrían ser útiles para otros grados relacionados con la biología, ¿para cuáles, en su caso?.

## II. DISEÑO DE LA ASIGNATURA: OBJETIVOS Y RETOS

En la Universidad de Alcalá los grados en Biología y Biología Sanitaria comenzaron a ofrecerse en el curso 2009-2010. Sus planes de estudios incluían, en ambos casos, una asignatura de Física en el primer curso, a la que se le asignaban 48 horas lectivas (6 créditos europeos ECTS), el 5% del total del Grado. Definido el objetivo central de aprendizaje de la asignatura (aprender a descubrir la física que subyace a la organización y funcionamiento de los sistemas vivos o, si se prefiere, descubrir cómo la Física contribuye a responder a preguntas importantes de la Biología), la experiencia en la licenciatura en Biología identificaba claramente cuáles iban a ser los dos retos principales: evitar el abandono y lograr un trabajo continuado y eficaz de los alumnos a lo largo del cuatrimestre, objetivos nada fáciles de lograr pero imprescindibles porque, *en España -y quizás también en muchos otros países-, la mayoría de los alumnos ingresa en los estudios universitarios de Biología con una formación baja o muy baja en física y matemáticas, con la idea de que ambas materias son de escasa utilidad para un biólogo, y con una capacidad bastante mayor para memorizar que para el razonamiento. Todo eso, combinado, produce en muchos de ellos una “barrera mental” respecto de la física que dificulta en gran medida el proceso de enseñanza-aprendizaje* [5]. Indicador de esa realidad (española al menos) podría ser el caso del Grado BIOSAN de la UAH, con alumnos procedentes de bastantes partes del país por tratarse de una oferta académica única. En el quinquenio 2010-2015, el que vamos a analizar aquí, el 80% de los alumnos no habían elegido Física y/o el 50% de ellos no habían elegido Matemáticas en el último curso de bachillerato. (Ambas asignaturas eran optativas en la rama del bachillerato recomendada para acceder al Grado en Biología). En consecuencia, el éxito o fracaso de la asignatura iba a estar supeditado a que ese grupo mayoritario de alumnos consiguiera desmontar su recelo o incluso rechazo a la Física (a lo cuantitativo), en un cuatrimestre. Por otra parte, dos nuevas circunstancias, que se introducían a la vez que los grados, podrían ayudar bastante: (i) un sistema-marco de evaluación continua (que en cada asignatura se tenía que acabar de perfilar) y (ii) una división del grupo general (unos cien alumnos) en cuatro grupos pequeños para seminarios y laboratorios, y a los que se otorgó el 50% de las horas lectivas. Aunque la experiencia en la licenciatura en Biología también decía que lo anterior no bastaría por sí solo y que, en última instancia, el porcentaje de aprobados iba a depender siempre del nivel matemático y de razonamiento que el profesor

considerara necesario. En la asignatura Física del Grado BIOSAN se produjo, desde el curso 2010-2011, otra circunstancia particular que duraría cinco años: tanto la teoría como los seminarios fueron impartidos por el profesor responsable (AdR, coautor de este trabajo), con la libertad que eso supuso para intentar una reforma. Esos cinco cursos son los que analizamos aquí. A lo largo de ese período la asignatura experimentó una continua evolución, realimentada por el análisis de los resultados del curso anterior, que el profesor iba haciendo con la colaboración de algunos alumnos destacados (en diferentes aspectos) y, a partir del 2012-2013 (tercer año del quinquenio analizado), por las propuestas de los físicos norteamericanos, hasta donde resultaban pertinentes y posibles en el grado BIOSAN. Esa evolución -lo veremos más adelante- afectará especialmente a la estrategia pedagógica -se fue profundizando en la opción “de la biología a la física” como se explica en el apartado III B-, a las metodologías docentes -se promovió y se dio apoyo, más allá del aula, al trabajo continuado de los alumnos- y al sistema de evaluación (continua) -se ampliaron las componentes de la nota final y se matizaron los criterios para medirlas; extendiendo además la evaluación a la convocatoria extraordinaria-. E implicará también un aumento progresivo del nivel matemático y de exigencia de razonamiento que, desde un nivel inicial intencionadamente bajo, el profesor fue ajustando a las posibilidades de los alumnos de ese Grado, cuya nota de corte para el ingreso fue siempre superior a 11 puntos (sobre un máximo de 14).

### III. ORGANIZACIÓN DE LA ASIGNATURA

#### A. Contenidos de la asignatura

En la publicación del equipo del proyecto *IPLS-Spain* [5] se describen, muy resumidos, los criterios utilizados para definir el programa (partes teórica y experimental), teniendo en cuenta los objetivos de aprendizaje. Su estructura básica y la distribución “macro” del tiempo asignado (6 ECTS/48 horas de docencia presencial) se muestran en la Tabla I.

**TABLA I.** Física BIOSAN 2010-2015: Estructura básica y distribución temporal “macro”.

Distribución del tiempo (6 ECTS)	Bloques temáticos generales
PARTE TEÓRICA 4,5 créditos (75%)	Análisis físico de procesos biológicos (3,4 créditos; 57%) Aplicaciones tecnológicas de la Física (1,1 créditos; 18%)
PARTE EXPERIMENTAL 1,5 créditos (25%)	Medida y error. Utilización de modelos físico-matemáticos en el cálculo del error de medidas indirectas.

El criterio básico para la elección de los temas de la parte teórica fue recorrer la biología (desde el nivel celular hasta el del ecosistema) a través de una cuidadosa selección de procesos biológicos en los que estuviera clara la física subyacente y fuera sencilla la matemática necesaria, teniendo en cuenta además la orientación del Grado (biología sanitaria). Procesos que se vertebraron en un discurso coherente de física, agregando la microscopía como ejemplo claro de aplicación tecnológica a la biología. El resultado final de esa selección (a partir del curso 2011-12, segundo año de la experiencia que estamos analizando) se recoge en la Tabla II.

#### B. Métodos. Evolución 2010-2015

El proceso de transformación de la asignatura, resultante de la realimentación aportada por la experiencia de cada curso, tuvo como primera consecuencia el reforzamiento de la estrategia pedagógica elegida, a pesar de sus dificultades y limitaciones. Como se señala en nuestro trabajo de referencia: *de las dos alternativas posibles, una de ellas –de la Física a la Biología– tiende a reforzar la citada barrera, mientras que la otra –de la Biología a la Física– es efectiva ayudando a desmontarla porque estimula claramente el esfuerzo que ello supone para el alumno.* Esta segunda estrategia es la que se inicia describiendo el proceso biológico a analizar y recurre luego a la física (y la matemática) necesaria para explicarlo. Llevarla a la práctica requiere tener en cuenta el nivel de conocimientos de los alumnos en física y matemáticas, abordando su estudio hasta donde resulta necesario para ilustrar la física del proceso biológico analizado, no más. Y demanda también al profesor una elaboración cuidadosa de las cuestiones a proponer; algo nada sencillo porque, como Meredith y Bolker señalan en un artículo muy citado [7] *existe una línea muy delgada entre problemas de física con conexiones biológicas únicamente superficiales y problemas que exigen demasiada física (y matemáticas) o son demasiado complejos.* A modo de ejemplo, resumimos en un **Anexo** el desarrollo de una de las lecciones que más difícil resultó (*el potencial de membrana celular*) porque los conocimientos básicos de física que requiere (electrodifusión) no se estudian en el bachillerato (español). Hubo no obstante una excepción, en este aspecto. En el bloque de microscopía, el análisis del *ojo (humano) como sistema óptico* se abordó como aplicación (y extensión) del funcionamiento de un sistema de lentes.

Como resultado de la citada realimentación de la asignatura, también evolucionaron los métodos de enseñanza del profesor, tratando de aprovechar mejor las condiciones ofrecidas por la Facultad en el logro de su principal tarea: estimular, orientar y acompañar al alumno en su imprescindible trabajo personal continuado. A partir del segundo año de la experiencia la universidad ofreció un *aula virtual* e instaló en las aulas ordenadores conectados a internet. Eso permitió mejorar la variedad y calidad de la información facilitada a los alumnos, aspecto no menor en una asignatura para la que no era posible seguir un único libro de texto. Esquemas detallados de cada lección (incluyendo gráficas, tablas y toda la matemática a utilizar), reflexiones y sugerencias para resolver las cuestiones propuestas,

comentarios sobre las referencias bibliográficas, artículos, audiovisuales, simulaciones.... El aula virtual permitió

también, y sobre todo, una comunicación permanente alumnos-alumnos-profesor y alumnos-profesor.

**TABLA II.** Programa Física BIOSAN 2011-2015 (parte teórica).

<i>CONTENIDOS</i>	<i>UNIDADES TEMÁTICAS</i>
Presentación de la asignatura (1 clase general)	-Física y Biología: ¿qué aporta la física a la formación de un biólogo?
Termodinámica de la vida (2 clases generales + 2 seminarios)	-Orden, sistemas complejos y vida: ¿Qué es lo esencial de los sistemas vivos? -Metabolismo y regulación térmica de un sistema vivo.
Bio-mecánica (4 clases generales + 2 seminarios)	-Fundamentos físicos de la locomoción (terrestre, vuelo, natación). -Locomoción humana.
	-Fundamentos físicos del movimiento de fluidos. -Sistema cardiovascular humano.
Bio-electricidad (5 clases generales + 3 seminarios)	-Electrodifusión y potencial de membrana celular. -Potencial de acción (génesis; propagación axonal).
Bio-radiaciones (6 clases generales + 2 seminarios)	-Radiaciones (electromagnéticas y corpusculares). Fuerzas nucleares. Radioactividad y desintegración. -Interacción radiación-materia. -Efectos biológicos de las radiaciones.
Óptica Aplicada (6 clases generales + 4 seminarios)	-Física de las lentes (ópticas y electromagnéticas) -Fundamentos físicos de los microscopios ópticos -Fundamentos físicos de los microscopios electrónicos -El ojo humano como sistema óptico
<b>Reflexión final:</b> <i>Con las gafas de la Física</i> (carta a los alumnos, con preguntas)	

### C. Evaluación de la asignatura

Con todo ello, evolucionaron en fondo y forma las clases generales *-magistrales* se llaman en España- hasta quedar centradas en subrayar las ideas fundamentales de cada tema en estudio; siempre en la dirección de reforzar la estrategia pedagógica elegida. Evolucionaron los seminarios: de estar dedicados a resolver algunas de las cuestiones propuestas en cada tema (las más difíciles) a dedicarlos a reflexionar y debatir sobre la aplicación de las ideas expuestas en las clases generales. Y fue posible organizar unos *foros de debate* que permitieron continuar los seminarios *en abierto*, planteando cualquier tipo de duda, resueltas algunas veces por los propios alumnos. Es más, las tutorías presenciales, colectivas la mayoría de ellas, se dedicaron a dudas que no se habían debatido o aclarado suficientemente en esos foros. Los cambios afectaron también a los contenidos del programa, para ajustarlos mejor al perfil específico del Grado. Aunque las modificaciones más trascendentes residieron (i) en la complejidad de los modelos físico-matemáticos utilizados que, desde un nivel más bajo que el de la Física de los Procesos Biológicos de la licenciatura, fue aumentando poco a poco en busca de un compromiso con las posibilidades del conjunto de los alumnos de ese grado y (ii) en una mayor exigencia de razonamiento en los exámenes.

La *evaluación continua* -opción que por normativa debió seguir la práctica totalidad de los estudiantes, pues solo unos pocos alumnos fueron autorizados por el Decanato para eludir la evaluación continua y presentarse a un examen final- estuvo diseñada, desde el principio, para estimular y valorar el trabajo continuado del alumno. La máxima nota de la asignatura eran 10 puntos, a lograr entre la parte teórica y la experimental. En la parte teórica se podían obtener hasta 7,5 puntos a través de tres exámenes parciales, uno por cada uno de los tres bloques de esa parte teórica; treinta preguntas en total que recorrían todas las lecciones del programa. Se ofrecía también, al final, la posibilidad de repetir uno de ellos, a elección del alumno (cuya calificación, mayor o menor, sustituía a la anterior). Todos los ejercicios de examen contenían preguntas “de respuesta múltiple”, que no demandaban explicación (aunque para responderlas el alumno debía realizar siempre un razonamiento, y a veces también un cálculo) y preguntas “abiertas”, que demandaban explícitamente una respuesta justificada. La proporción de estas últimas fue aumentando curso a curso, desde un 20% inicial hasta llegar al 50% en el último curso de la experiencia (2014-15). Dicha mayor exigencia de justificación de las respuestas fue acompañada de un aumento importante del tiempo disponible para realizar los exámenes. Por otra parte, todas las preguntas de examen eran similares a cuestiones propuestas para su discusión y

Armando del Romero, Miguel Sancho y Paula Ortiz discutidas (en los seminarios y/o en los foros de debate del aula virtual).

En la parte experimental se podían obtener 2,5 puntos; hasta un 60% (1,5 puntos) realizando cuatro prácticas individualmente -con la tutoría de un profesor- cuyo resultado había que entregar al final de la sesión (2 horas); y hasta un 40% (1 punto) a través de un examen que pretendía medir la comprensión de los conceptos y métodos utilizados para realizar las medidas y estimar su error.

No se exigía aprobar ambas partes por separado, pudiendo compensar un peor resultado en una de ellas (teórica o experimental) con uno mejor en la otra.

A los alumnos que lograban sumar cinco puntos (sobre 10) con todas las notas anteriores (el mínimo para aprobar), se les agregaba la calificación obtenida por su participación en los foros de debate. Y a los que resultaban más destacados teniendo en cuenta esa suma se les ofrecía la opción de realizar un trabajo final (sobre un tema propuesto por el profesor) que solamente computaba si su calificación resultaba igual o superior a la suma de todas las demás. Por estos dos últimos

conceptos el alumno aprobado podía obtener hasta 2,5 puntos adicionales. De ese grupo surgieron siempre las calificaciones más altas.

La *convocatoria extraordinaria* resultaba, en gran parte, una prolongación de la evaluación continua, pues el alumno podía conservar la nota de los bloques aprobados y la de los foros de debate. Lo cual aumentaba un mes más (de cuatro a cinco) el tiempo disponible para lograr el nivel mínimo -la asignatura se impartía en el 2º cuatrimestre- estimulando así un esfuerzo adicional en los alumnos que en la convocatoria ordinaria habían quedado cerca del nivel de suficiencia.

#### IV. PRINCIPALES RESULTADOS 2010-2015: LECTURA CRÍTICA

Los datos más relevantes de la asignatura, desglosados por cursos, se recogen en la Tabla III.

**Tabla III.** Física BIOSAN 2010-2015: datos más relevantes.

curso		2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15
<b>matriculados</b>		86	111	114	115	118
<b>nota de corte al ingreso</b> (sobre un máximo de 14)		11,0	11,3	11,5	11,7	11,8
<b>inician la asignatura</b> (presentándose al primer examen de la evaluación continua)	<b>TOTAL (N)</b>	77	98	108	108	115
	con Física II (bachillerato)	21%	22%	22%	21%	23%
	Repetidores	15%	15%	8%	20%	22%
<b>aprueban / inician asignatura</b>	evaluación continua (todos)	49%	67%	46%	61%	57%
	evaluación continua (con Fis. II)	92%	76%	61%	83%	69%
	convocatoria extraordinaria	26%	17%	28%	8%	13%
	<b>total curso</b>	<b>75%</b>	<b>84%</b>	<b>74%</b>	<b>70%</b>	<b>70%</b>
<b>asistencia a los seminarios (alumnos nuevos)</b>		74%	78%	94%	89%	80%
<b>foros de debate</b>	visualizaciones	no hubo	8.791	21.232	19.438	24.219
	comentarios relevantes	aula virtual	120	192	344	330
	alumnos destacados (i)	virtual	12	18	8	18
	(i) que hicieron <i>m</i> comentarios relevantes en los debates.	---	$m \geq 5$	$m \geq 5$	$m \geq 5$	$m \geq 4$

#### Indicador principal

El sistema de evaluación formaba parte de la guía docente de la asignatura (*syllabus*) aprobada por el Departamento y ratificada por la Facultad. En este caso, además, fue uno de los aspectos debatidos por el equipo del proyecto *IPLS-Spain* (epígrafe I), a partir del análisis del conjunto de las *evaluaciones críticas* realizadas al final de cada curso por dos

o tres de los alumnos más destacados en diferentes aspectos (de forma voluntaria y sin repercusión en su calificación). El equipo valoró la pertinencia del sistema diseñado, así como su mejora al incluir los ajustes que el profesor fue haciendo para recoger las sugerencias justificadas de los alumnos consultados. Aceptemos pues que el sistema de evaluación era adecuado para medir el logro de los objetivos de aprendizaje de la asignatura, siendo el principal de ellos

comprender la física que subyace al funcionamiento de los sistemas y procesos biológicos estudiados. Y aceptemos que demostrar esa comprensión en al menos la mitad de los temas abordados -suficiente para aprobar- indicaba que el alumno había logrado ese objetivo; incluso compensando (hasta cierto punto) un resultado algo peor en una parte (teórica o experimental) con otro algo mejor en la otra (no se exigía aprobar ambas partes por separado). La nota final resultaba de varios componentes porque la asignatura tuvo otros objetivos de aprendizaje pero, teóricamente al menos, no se podía aprobar sin haber logrado un nivel aceptable en el fundamental. En consecuencia, el porcentaje de aprobados será el primer y más importante indicador del logro del objetivo principal; siempre y cuando fuera pequeño el abandono a lo largo del cuatrimestre.

Y fue pequeño. En el total de los cinco años analizados el 92% de los matriculados (504) inició realmente el curso al presentarse a la primera prueba evaluable, que se celebraba al comienzo del segundo mes. Y de esos, el 94% (474 alumnos) completó la asignatura, presentándose a una o a las dos convocatorias (ordinaria y extraordinaria). Es decir, un 6% de abandono promedio en los cinco años (mínimo 3%, máximo 11%). El número total de aprobados en esos cinco cursos fue de 375 (52 de ellos, repetidores). Esa cifra representa el 74% de los alumnos que iniciaron la asignatura, y el 79% de los alumnos que la completaron (exámenes teóricos y prácticas de laboratorio). De ese 79% de aprobados, en la convocatoria ordinaria lo hizo el 79% y en la extraordinaria el 21%. Aunque teniendo en cuenta que fue una asignatura en continua evolución y ajuste al perfil de los alumnos de ese grado (Biología Sanitaria), consideramos que los resultados de los dos últimos cursos tienen un mayor interés.

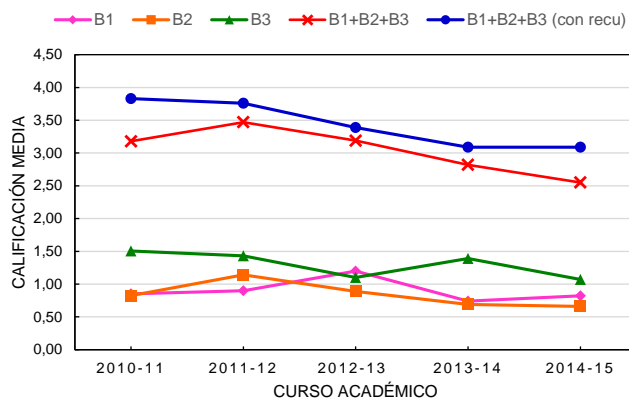
### A. Análisis del indicador

Un primer desglose será valorar el peso real de las dos partes de la asignatura en la nota final -siendo 75% y 25% las proporciones teóricas- porque esa *compensación*, obligada por la normativa reguladora del grado (UAH), pudo ser determinante para el porcentaje de aprobados de la asignatura. En el caso más extremo compensar ambas partes permitía la posibilidad de que un alumno pudiera haber aprobado la asignatura con 2,5 puntos en la parte experimental (máxima calificación posible) y 2,5 puntos la teórica (tercera parte de la calificación máxima en esta parte). Pero veamos lo que ocurrió en la práctica: En el conjunto de los cinco cursos el peso de la parte experimental (ponderado por el número de alumnos presentados en cada una de ellas) representó el 31% de la nota final en la evaluación continua y el 32% en la convocatoria extraordinaria, siendo el 25% su peso teórico ideal; una “desviación” que nos parece aceptable, al menos en términos estadísticos, porque su impacto fue pequeño en la calificación de la parte teórica. Veamos como ejemplo la evaluación continua del curso 2013-14, en el que fue más alta la nota media (de los aprobados) en la parte experimental:  $1,90 \pm 0,04$  puntos. En ese curso, la nota media de esos mismos alumnos, antes de computar foros y trabajos especiales, fue  $5,49 \pm 0,08$  puntos, por lo que, en promedio, se pudo aprobar la asignatura con *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 12, No. 2, June 2018*

una nota en la parte teórica de  $3,59 \pm 0,12$  puntos (sobre 7,5), que en escala 10 equivalen a  $4,79 \pm 0,16$  puntos. Por tanto, aunque pudieran darse algunos casos “discutibles”, la posibilidad de compensar favoreció fundamentalmente a un grupo de alumnos con una nota en la parte teórica claramente aceptable.

### B. Evolución de las calificaciones en la evaluación continua

En la Figura 1 vemos que la nota media de la parte teórica va disminuyendo curso a curso (un 21% en el conjunto de los cinco años); lo que se correlaciona, en buena parte, con el descenso en el porcentaje total de aprobados (Tabla III).



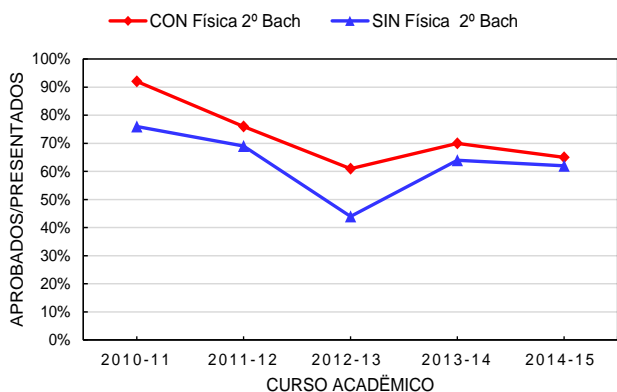
**FIGURA 1.** Calificaciones medias en la evaluación continua (parte teórica): componentes de la nota (parciales B1, B2, B3) e impacto del examen de recuperación (de uno de los tres parciales).

Interpretamos esa progresiva reducción de la nota media como consecuencia del también progresivo aumento de la complejidad de los modelos físico-matemáticos utilizados, así como del mayor nivel de razonamiento en el desarrollo de los temas abordados y de exigencia en los exámenes. Por ejemplo, para calcular el trabajo que realiza un humano al desplazarse una zancada no es lo mismo suponer que fuerza que ejerce el pie sobre el suelo es constante (un valor medio) que hacerlo tras demostrar que esa fuerza es variable. ¿Hasta dónde aumentar dichos niveles? Ese ajuste sería, como hemos dicho, una de las decisiones importantes que cada profesor debe tomar, en función del perfil del grado. En nuestro caso, el profesor consideró que el nivel alcanzado en el curso 2013-14, era el máximo compatible con la estrategia general de la asignatura, incompatible con un nivel alto de suspensos. El curso siguiente, el nivel de razonamiento y exigencia se mantuvo similar. Lo que explica, en nuestra opinión, que fuera igual el porcentaje total de aprobados respecto de los alumnos que iniciaron la asignatura presentándose al primer examen parcial (70%).

### C. Efectos de la falta de formación previa

¿Hasta qué punto fue un hándicap no haber cursado la asignatura Física en 2º de bachillerato? En la Tabla III

puede verse que, en la convocatoria ordinaria, el porcentaje de aprobados del grupo que había cursado la Física II, fue siempre superior al mismo porcentaje referido al conjunto del curso: entre 9 (2011-12) y 22 puntos (2013-14), obviando el primer curso, 2010-2011, porque en él hubo que superar una nota de corte, en cada parcial, para poder continuar la evaluación continua, condición que se suprimió el curso siguiente. Pero si separamos a los alumnos en dos grupos (con y sin Física II), medimos el porcentaje de aprobados respecto de los que completaron la evaluación continua y comparamos los resultados observaremos que la diferencia se fue reduciendo (Figura 2).



**FIGURA 2.** Porcentaje de alumnos aprobados en la evaluación continua respecto del total de los que la completaron. Comparación entre grupos que cursaron o no la asignatura de Física en 2º curso de Bachillerato

Y dos datos más, necesarios para valorar correctamente el resultado: el 11% de abandonos a lo largo de la evaluación continua (en promedio) estuvo formado casi totalmente por alumnos que no habían cursado Física II; y casi ninguno de ellos se presentaría, un mes más tarde, a la convocatoria extraordinaria. En tanto que, curso tras curso, los alumnos con Física II que repitieron la asignatura fueron la excepción.

Todo ello confirma que no haber cursado la Física II fue un hándicap, pero también indica (i) que fue un hándicap que la mayoría logró superar y (ii) que la evolución de la asignatura a lo largo de los cinco años fue efectiva reduciendo en buena parte el impacto de la diferencia de formación inicial en el resultado final. Aunque muy probablemente esos alumnos tuvieron que hacer un esfuerzo mayor para lograr un mismo resultado.

#### D. Indicadores del trabajo continuado de los alumnos y de su eficacia

Las cifras de seguimiento del curso comentadas al inicio de esta sección (94% en promedio) señalan una condición previa que resulta esencial para el éxito de cualquier asignatura: no abandonar. Necesaria, aunque no suficiente.

Pues bien, dos indicadores sugieren un trabajo continuado de los estudiantes (Tabla III). El primero es la participación de los alumnos en los “foros de debate” del aula virtual de la asignatura. Voluntaria y evaluada, la participación activa en

ellos osciló entre el 8 y el 18%. No es una cifra alta, pero parece que tuvo un gran impacto porque el seguimiento de los debates por parte del resto de los alumnos, tras un primer año de prueba (2011-12), se mantuvo en torno a unas veinte mil visualizaciones por curso (5 meses). Tratar de aumentar la participación activa fue objeto de consultas del profesor con numerosos alumnos, pero encontrar la manera de superar ese techo fue un tema que quedó pendiente. El otro indicador es la asistencia de los alumnos de nuevo ingreso (que fueron mayoría) a los seminarios de la parte teórica: osciló entre el 74 y el 94%. Esa asistencia, que el profesor registraba pasando lista personalmente, permitió en los dos últimos cursos obtener puntos adicionales en la evaluación por aportaciones “relevantes para la discusión”. Fueron pocas, pero las hubo.

Aunque el esfuerzo de los alumnos (y del profesor) no siempre es eficaz, en esta asignatura lo fue. El indicador más objetivo de la evolución en el proceso de enseñanza-aprendizaje se observa en los resultados de los exámenes de las diferentes pruebas parciales en cada año (Figura 1). El despegue se inicia en tercer parcial (B3) y se completa en el examen de recuperación (de unos de los bloques). Promediando los cinco años, mientras que en el primer bloque teórico solamente aprueba un 37% de los presentados, la evaluación continua es aprobada por un 64%. De esta cifra, 20 puntos corresponden a la prueba (voluntaria) de recuperación, fruto del esfuerzo entre el tercer parcial y el examen final, que se celebraba un mes más tarde.

#### V. REFLEXIÓN FINAL: LÍMITES Y POSIBLE UTILIDAD DE LA EXPERIENCIA.

Los anteriores resultados -muy bajo abandono, trabajo continuado, alto porcentaje de aprobados (con un impacto pequeño de la diferencia de formación inicial) y una cifra significativa de notables y sobresalientes- supusieron un giro de ciento ochenta grados respecto de los de la “Física de los procesos Biológicos” de la licenciatura en Biología, impartida en sus últimos años por el mismo profesor. Con una pedagogía “de la física a la biología”, una metodología educativa convencional, un sistema de evaluación centrado en el examen final y una dedicación pequeña fuera de las horas de clase (tutorías), el nivel de abandono pocas veces bajó de 50% de los matriculados, y el porcentaje de aprobados llegaba con dificultad al 50% de los presentados. Y lo que es más importante, esos resultados indican que es posible que un porcentaje muy importante de los alumnos aprenda, en un cuatrimestre, cómo la física permite mejorar cualitativamente la comprensión de los procesos biológicos, aunque haya ingresado con una preparación deficiente en física ( $\approx 80\%$  sin haber cursado Física en el último curso de bachillerato) y en matemáticas ( $\approx 50\%$  sin haber cursado Matemáticas en el último curso de bachillerato); y, probablemente, con recelo hacia la Física y hacia “lo cuantitativo”. En los dos últimos cursos analizados aquí, una vez alcanzado un compromiso *de facto* en el nivel de exigencia (matemático y de razonamiento) entre “lo mejor” y “lo posible” -es decir, el nivel máximo que alumnos y

profesor de ese grado podían lograr en un tiempo tan escaso- hemos visto que, de los presentados, un 70% de ellos aprobó la asignatura y un 6% obtuvo notable o sobresaliente.

Sin embargo, *al menos dos problemas importantes quedaron por resolver*. Por un lado, el 30% de suspensos de los últimos años generó un grupo significativo de repetidores cuya presencia el año siguiente justificaba y reforzaba el temor o rechazo inicial a la Física en los alumnos de nuevo ingreso. Especialmente si en las demás asignaturas no ocurre. En el curso 2014-15 por ejemplo, ninguna otra asignatura del primer curso del Grado BIOSAN de la UAH tuvo una “tasa de fracaso” (suspensos/presentados) superior al 11%. Por el otro lado, una asignatura tan focalizada en las necesidades de una parte de los alumnos, aunque fuera la mayoritaria, probablemente implicó “perjuicios” para ese 20% que, habiendo elegido la Física en 2º de bachillerato, posiblemente ingresó sin la citada “barrera mental” y con capacidad para haber profundizado más en el propósito de la asignatura. Aunque las soluciones a estas cuestiones no son sencillas y forman parte del desafío a que se enfrentan los docentes, y no solo en esta asignatura, apuntamos algunas ideas para abordarlas.

#### **A. ¿Cómo reducir la tasa de suspensos sin comprometer los objetivos de aprendizaje?**

Una vía podría ser reducir los contenidos del programa. Suprimir algunos temas para poder dedicar más tiempo a los demás podría permitir que más estudiantes “con barrera” llegaran al nivel de suficiencia y que los demás pudieran profundizar un poco más en el propósito de la asignatura: integrar la perspectiva que aporta la física en la construcción del futuro biólogo. El informe 2011 del proyecto *Vision and Change*, en su “llamada a la acción” a todos los académicos implicados en sus *majors* en Biología, finaliza con una reflexión sobre el viejo debate “profundidad versus amplitud” recomendando reducir los programas de todas las asignaturas en beneficio de una mayor profundidad en los temas abordados, *que deberían ser elegidos para ayudar al estudiante a comprender el marco conceptual sobre el cual se construye la propia ciencia y del que surgen los descubrimientos* [2] En España e Iberoamérica algunos autores recuerdan que ese dilema afecta especialmente a la enseñanza de la física (y de las matemáticas) y recomiendan *una renuncia decidida a la extensión de los contenidos en el currículo* [8]. En Física BIOSAN podrían haberse suprimido los contenidos relativos a las aplicaciones tecnológicas de la física (18% de los créditos), que es un tipo de *utilidad* que los alumnos (y la sociedad) tienen más clara, sin comprometer el objetivo principal de aprendizaje. Y en otros grados o licenciaturas cabe incluso que el programa adecuado fuera aún más reducido.

Otra vía, complementaria, sería aumentar el tiempo dedicado a seminarios disminuyendo el de clases generales, a parecer mucho menos útiles. De hecho, en sus *análisis críticos*, la mayoría de los alumnos consultados apuntaba esta recomendación, argumentando que en los seminarios era

donde arrancaba verdaderamente su proceso de aprendizaje del tema abordado. Quizás para otro tipo de asignaturas fuera adecuada la distribución de los ECTS acordada por la Facultad de Biología UAH (50% magistrales y 50% grupos pequeños), pero para la Física, y con la estrategia pedagógica elegida, hubiera bastado con un 20-25% de clases generales. Aunque somos también conscientes de que una distribución variable entre clases generales y clases prácticas, sería muy difícil de implementar en la práctica.

#### **B. ¿Las lecciones aprendidas en la experiencia Física BIOSAN, positivas y negativas, podrían ser útiles para otros grados o licenciaturas en Biología?**

La duda puede surgir al considerar que el grado de Biología Sanitaria tiene un perfil especializado (al igual que otros grados como Biotecnología, Bioquímica y Biología Molecular...) y exige alta nota de corte para el ingreso. Una de las principales conclusiones del proceso de reforma de los IPLS en los EEUU es que no existe un modelo que se ajuste a todos los contextos y que la opción más adecuada dependerá del plan de estudios y de sus circunstancias; recomendando vivamente, eso sí, dialogar, negociar y colaborar con los biólogos para reformar la asignatura [4].

Trataremos pues de responder a la pregunta valorando hasta qué punto fueron particulares las (principales) circunstancias de la Física BIOSAN de la UAH.

- *Nota de corte para el ingreso*. Una circunstancia obvia reside en la capacidad de aprendizaje de los alumnos del grado. Tomando la nota de corte como un indicador (aproximado) de esa capacidad, el Grado BIOSAN 2010-15 estaría en el grupo de los que exigieron una nota mínima por encima de once puntos (Tabla III). En España, un rastreo por internet en el curso 2016-2017 nos ha permitido identificar 68 bio-grados -Biología (con cualquier calificativo adicional), Biotecnología o Bioquímica y Biología Molecular- con al menos una asignatura de Física en su plan de estudios; entre ellos, 34 son grados en Biología (con cualquier calificativo). Con nota de corte igual o superior a 11.0 puntos (sobre 14) hay 32 bio-grados (47%), 8 de los cuales (25%) son grados en Biología (con cualquier calificativo). Así pues, el Grado BIOSAN de la UAH no es en ese sentido un caso único en España. En todo caso, la experiencia BIOSAN entre 2010 y 2015 parece sugerir que la principal “ventaja” de esos estudiantes estuvo más ligada a la autoestima, capacidad de trabajo y disposición para el esfuerzo que a la deficiencia en su formación básica, que pudo subsanarse en un cuatrimestre.

- *Esfuerzo del alumno y dedicación del profesor. Estrategia pedagógica*. Porque otra de las lecciones sugeridas por la experiencia que estamos analizando, quizás la más clara, es que incluso en un grado con una nota de corte alta el éxito de la asignatura requiere un trabajo continuado y eficaz de los alumnos a lo largo del cuatrimestre. Lo cual pasa en nuestra opinión por: (i) asociar biología y física con claridad y desde el principio (de ahí que sea más adecuada la estrategia pedagógica elegida que la contraria), (ii) acompañar y orientar al alumno en su proceso de aprendizaje



(antes, durante y después de las clases presenciales) y (iii) un sistema de evaluación que primero indique al alumno cuál es su nivel inicial (1ª evaluación) y luego vaya reconociendo los frutos de su trabajo (siguientes evaluaciones y participación en las actividades, dentro y fuera del aula). Todo ello exige al profesor de Física una dedicación especial (mayor quizás a la que demanda la Física General en otros grados). Esa carga de trabajo adicional para el profesor, no reconocida por el sistema, es en nuestra opinión otra de las circunstancias más determinantes para el éxito o fracaso de la Física en los bio-grados. Y parece que eso es bastante general, incluso en las universidades de los EEUU [4]; no es algo particular de España.

- *Nivel de los modelos físico-matemáticos (y exigencia de razonamiento).* Supongamos que el profesor(es) (i) estuviera de acuerdo en la estrategia pedagógica y también en el criterio de reducir la extensión del programa (en beneficio de un mayor “espacio” para los temas elegidos) y (ii) estuviera dispuesto a dedicar el tiempo que requiere “acompañar” a sus alumnos (en muchos casos, del orden de un centenar o más). Y supongamos que el nivel matemático de los modelos físicos utilizados y el nivel de exigencia de razonamiento en las evaluaciones fuera suficiente (el mínimo necesario) para lograr el objetivo principal de la asignatura (una comprensión básica de los fundamentos físicos de los fenómenos biológicos). ¿Sería razonable esperar una tasa de éxito aceptable en cualquier bio-grado (valorada en el contexto del grado en el que se imparta)? En nuestra opinión la experiencia Física BIOSAN no arroja luz suficiente para responder a esta pregunta, ni en un sentido ni en otro. Ni siquiera para los grados españoles.

Un hándicap aquí es la falta de referencias de otras experiencias similares, al menos en España. Hasta donde hemos logrado averiguar, es muy alta la “carga docente” actual de muchos de los profesores universitarios de física, son minoría los que investigan en campos fronterizos con la biología (y que por tanto no necesitan dedicar tiempo a ampliar sus conocimientos en esa frontera) y, por otra parte, se carece de estrategias pedagógicas en campos interdisciplinarios. En los EEUU, uno de los principales propósitos del congreso celebrado en 2014 sobre los IPLS fue abrir un espacio a nivel nacional para poner en común las experiencias de reforma de esos cursos; intercambio que consideraron imprescindible [4].

Hemos analizado, críticamente, lo que se logró y lo que no se logró en una asignatura de Física (6 ECTS) de un grado en Biología (240 ECTS, impartidos en 4 cursos académicos) cuya *memoria* consideraba la física como “conocimiento específico complementario” en el proceso formativo de los futuros graduados: *Deberán aprender los principios físicos, químicos y estadísticos de uso habitual en la Biología* [9]. Nosotros pensamos que la física puede y debería contribuir más y mejor a la formación de los biólogos que la sociedad necesita, y que eso requiere un “espacio” adecuado para esa disciplina en el plan de estudios de los grados o licenciaturas en Biología [5]. Que el papel del curso introductorio -IPLS, en el mundo anglosajón- es y será fundamental; más aún si esa asignatura fuera el único contacto con la física del futuro biólogo en toda su carrera. Que ese curso introductorio

demanda una profunda reforma, en fondo y forma, respecto de la manera mayoritaria de diseñarlo e impartirlo en España (y en otros países). Que los criterios acordados por los físicos estadounidenses para realizar esa reforma [4] nos parecen adecuados y en gran parte aplicables en los grados españoles (y probablemente en los de otros países iberoamericanos). Y que los resultados de la experiencia en el Grado de Biología Sanitaria de la UAH entre 2010 y 2015 -iniciativa de un profesor con el único apoyo de su Departamento- señalan que, aunque quedaran algunas dificultades importantes por superar, esa es la buena dirección. Sin embargo, también nos parece claro que solamente se podrá lograr maximizar la utilidad de la física (de las ciencias básicas) para los futuros biólogos en el marco de una reforma integral de los grados o licenciaturas en Biología (con cualquier calificativo), en cada país. Y que para ello es imprescindible un diálogo sin prejuicios entre todos los actores concernidos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de las actividades del proyecto *Introductory Physics Life Sciences for BSc Biology in Spain (IPLS-Spain)*, citado en el texto, que está intentando promover un diálogo entre físicos y educadores involucrados en la formación de biólogos y biólogos senior y estudiantes de biología (de doctorado, master y grado). Los firmantes agradecemos al profesor José Otero Gutiérrez (Universidad de Alcalá, España) sus enriquecedores comentarios y sugerencias.

## REFERENCIAS

- [1] Brewer, C. A. & Smith D., *Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action*. A summary of recommendations made at a national conference organized by the American Association for the Advancement of Science, (AAAS, Washington DC., 2009). <http://visionandchange.org/files/2011/03/VC-Brochure-V6-3.pdf>
- [2] Brewer, C. A. & Smith, D., *Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action. Final Report*, (AAAS, Washington DC, 2011). <http://visionandchange.org/finalreport/>
- [3] *Project Vision and Change in Undergraduate Biology Education*. The American Association for the Advancement of Science. <http://visionandchange.org/>. Consultado el 6 de septiembre de 2017.
- [4] *Conference on Introductory Physics for the Life Sciences Report*, (AAPT, College Park, MD, 2015). <http://www.compadre.org/IPLS/documents/IPLS-Final-Report.pdf>
- [5] del Romero, A., Sancho, M., Ros G., Herrera, L., Suárez, J., Ramón, G., Selfa, L., Berzal, N., Refoyo, A., Correa, J., González, S., Molina, A., & Delgado, S. *La Física en la formación de los biólogos del siglo XXI. Reflexión y propuesta para los grados españoles en Biología*. Revista

- Española de Física **31**, 1 (2017); y Revista de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular **191**, (2017).
- [6] del Romero, A., Correa, J., González S., & Molina A. *Tratando de desmontar la artificial barrera entre física y biología en la formación de futuros biólogos. Lecciones de una experiencia (2010-2015) en un Grado en Biología*. Resúmenes de la XXXVI Biental de la RSEF, Santiago de Compostela (2017).
- [7] Meredith, D. C. & Bolker, J. A., *Rounding off the cow: challenges and successes in an interdisciplinary physics course for life science students*, American Journal of Physics **80**, 913 (2012).
- [8] Pérez de Landazábal, M. C., Benegas, J., Cabrera, J. S., Espejo, R., Macías, A., Otero, J., Seballos, S., Zavala, G. *Comprensión de conceptos básicos de la Física por alumnos que acceden a la universidad en España e Iberoamérica: limitaciones y propuestas de mejora*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **4**, 3 (2010).
- [9] Universidad de Alcalá, España. *Memoria oficial para la acreditación del plan de estudios del título universitario "Grado en Biología Sanitaria"*. Documento de acceso restringido al PDI de la Universidad, (2009), pág.19.

## ANEXO

### EJEMPLO DE PEDAGOGÍA “de la biología a la física”: el potencial de membrana celular.

El bloque “BIOELECTRICIDAD” constaba de dos procesos biológicos: (i) *potencial de membrana celular* (una manera de nombrar al equilibrio electroquímico que se establece entre cualquier célula viva y su medio) y (ii) *fundamentos físicos de la conducción nerviosa (axonal)*. Para comprender ambos temas, además de unos conocimientos básicos de campo y de corriente eléctrica, es necesario también conocer las bases del fenómeno de la electrodifusión que no se estudia en el bachillerato. Eso obligó a introducir una lección para estudiar sus fundamentos.

No obstante, el primer tema no comenzaba abordando esos fundamentos sino *describiendo el escenario a explicar y haciendo medidas virtuales* (de las concentraciones iónicas y de la diferencia de potencial transmembrana) en distintos tipos de célula, para descubrir que esa diferencia de potencial es característica de cada tipo y formular algunas preguntas que esas medidas suscitan desde el punto de vista de la física. Todo ello permitía identificar la naturaleza electroquímica del equilibrio que queríamos comprender; es decir, ponernos “las gafas de la física”, comenzando por dirigir nuestra atención sobre la difusión de partículas (neutras primero, cargadas después) y formularla matemáticamente (flujo difusivo, flujo eléctrico). Más adelante se detalla un poco más este relato.

El análisis del segundo tema del bloque comenzaba también en un laboratorio virtual, simulando un experimento con el axón gigante del calamar, descubriendo que responden a un estímulo con un cambio de su potencial de membrana que, dependiendo del estímulo, puede o no transmitirse.

**I. INFORMACIÓN:** facilitada antes del inicio del bloque (vía “aula virtual”)

### A. Introducción general. Bibliografía y recursos recomendados

- i) *Comentario sobre los procesos a explicar. Esquema del bloque.*
- ii) *Bibliografía*
  - Básica: *Benedek & Villars*, Physics with illustrative examples from Biology and Medicine, vol.3. *Kane & Sternheim*, Física.
  - Complementaria: *Cussó, López y Villar*, Fundamentos físicos de los procesos biológicos, vol. 3. *M. Aguilar*, Bioelectromagnetismo: campos eléctricos y magnéticos y seres vivos
  - *Simulación bomba sodio/potasio*:  
<http://www.youtube.com/watch?v=hcF8ZiintNA&NR=1>

### B. Programa detallado de los contenidos

Tema 1. ELECTRODIFUSIÓN EN UN MEDIO LIBRE (*se facilitó un desarrollo de la lección, a modo de “borrador de apuntes”*)

- 1.1 *Electrodifusión de una única especie iónica*
  - i) difusión de partículas neutras; ley de Fick
  - ii) difusión de partículas cargadas: flujo eléctrico y flujo difusivo
  - iii) movilidad y difusión del soluto
  - iv) ecuación general (Nernst-Plank)

1.2 *Electrodifusión de dos especies iónicas (con cargas positiva y negativa)*

- i) en ausencia de campo eléctrico externo; potencial de difusión
- ii) en presencia de campo eléctrico externo; flujo de masa y flujo de carga

Tema 2. ELECTRODIFUSIÓN A TRAVÉS DE UNA MEMBRANA SEMIPERMEABLE (*esquema de la lección, que el alumno deberá desarrollar*)

2.1 *Membrana artificial: equilibrio Donnan entre dos soluciones iónicas.*

- i) medidas experimentales
- ii) interpretación física; potencial de Nernst de una especie iónica; electroneutralidad

2.2 *Membrana celular (célula muscular rana; axón gigante calamar)*

- i) medidas experimentales
- ii) interpretación física
- iii) la bomba de iones celular
- iv) influencia de la permeabilidad de la membrana

### C. Hoja de cuestiones

*Contiene las respuestas a las 18 cuestiones propuestas, y explicaciones tanto más detalladas sobre la solución cuanto mayor es su dificultad. Ocho de ellas se refieren a los fundamentos de la electrodifusión y las otras diez al equilibrio electroquímico celular; en ambos casos su dificultad es creciente. Por otra parte tres cuestiones*

contienen preguntas sobre los conceptos básicos del tema y las otras quince son aplicaciones que requieren hacer un razonamiento y/o realizar un cálculo.

## II. DESARROLLO DEL TEMA 1 (potencial de membrana celular). El tema incluía los citados fundamentos de la electrodifusión.

### A. Planteamiento y desarrollo (3 clases magistrales)

i) Justificación del tema en el programa: ¿por qué es importante para la biología?

ii) El escenario a explicar (esquema); ¿qué obtenemos si medimos el potencial de membrana celular y las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  de diferentes células? Preguntas que esas medidas suscitan desde el punto de vista de la física (y del sentido común).

iii) Experimento virtual no biológico: Equilibrio electroquímico entre dos soluciones iónicas (con cargas +/-) separadas por una membrana semipermeable: ¿qué obtenemos si medimos la diferencia de potencial y las concentraciones?

iv) ¿Qué dice la física del tipo de equilibrio que (a veces) se establece entre ambas soluciones?: El fenómeno de la difusión/electrodifusión.

- Ley básica (las reglas del juego): electrodifusión de un ion en un medio libre (Fick, campo y corriente eléctrica, Nernst-Plank)

- Difusión de una especie iónica en una dimensión (tubo estrecho)

- Electrodifusión de dos especies (+/-) a lo largo de un tubo estrecho (una dimensión); flujo de masa y flujo de carga; concepto de corriente iónica

- Explicación del equilibrio no biológico (modelo físico): equilibrio Donnan

- Regreso al escenario inicial virtual (célula muscular rana; axón gigante calamar)

- el equilibrio electroquímico que se observa entre los fluidos intra y extracelular: ¿es tipo-Donnan?

- la necesidad de una bomba  $\text{Na}/\text{K}$ ; concepto de “bomba” (sobre un ejemplo sencillo)

- justificación de que la bomba  $\text{Na}/\text{K}$  existe (experimento virtual)

- permeabilidad de la membrana; influencia en el equilibrio que se establece; justificación de los diferentes valores del potencial de membrana celular

- generalización de las conclusiones; esquema para una célula-tipo (Figura A1)

### B. Acotar el tema en profundidad y alcance.

#### Iniciar el debate (2 seminarios)

i) Un primer seminario, extraordinario para este tema -se realizaba al inicio del bloque “medidas eléctricas”, de laboratorio- se dedicaba a repasar los conceptos básicos de electricidad, necesarios también para esas prácticas.

ii) El segundo seminario era “ordinario”. El profesor comenzaba pasando lista, pausadamente, tratando de

“personalizar” al alumno y fijar su atención. A continuación formulaba preguntas del siguiente tipo: *de nuevo debemos*

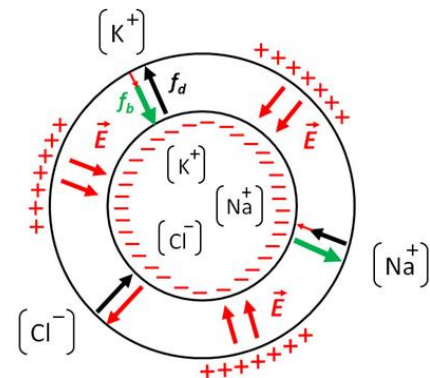


FIGURA A1. Equilibrio electroquímico básico de una célula-tipo con su medio

construir una cesta de conocimientos sobre este tema...

Comencemos por los mimbres básicos, que nos permitan una primera aproximación a la explicación: ¿Qué es lo que tratamos de entender aquí?, ¿y que aporta la física? ¿alguien puede señalar alguna de las ideas centrales de este tema (que comentamos en la clase general)? Algunos de los alumnos solían responder y así se iba comenzando el proceso de aprendizaje. De ahí a valorar la hoja de cuestiones propuestas, en conjunto, y proponer la discusión de algunas de las no totalmente resueltas. Pero el seminario servía sobre todo para inducir en el alumno una actitud activa, estimulando el imprescindible trabajo continuado que deberá seguir haciendo. La clase finalizaba constatando que apenas se había iniciado la construcción de la cesta e invitando a continuar en los foros de debate del aula virtual.

Ejemplos de dos cuestiones que resultaron “difíciles” (y que en la hoja se explicaban con detalle)

i) Efecto de la bomba de iones en el equilibrio electroquímico celular (cuestión que exigía realizar un cálculo). El potencial de membrana del glóbulo rojo en el medio sanguíneo es, a  $37^\circ\text{C}$ ,  $V_m = -10\text{ mV}$ . Las concentraciones intra y extracelular de las principales especies iónicas permeantes son (en  $\text{mmol/l}$ ):  $[\text{Cl}^-]_{\text{int}} = 74.7$ ,  $[\text{Cl}^-]_{\text{ext}} = 110$ ;  $[\text{Na}^+]_{\text{int}} = 19$ ,  $[\text{Na}^+]_{\text{ext}} = 153$ ;  $[\text{K}^+]_{\text{int}} = 136$ ,  $[\text{K}^+]_{\text{ext}} = 4.3$ .

a) Suponiendo una única especie  $\text{A}^-$  no-permeante en el interior de la célula con carga  $-4e$ , deducir el valor de su concentración.

b) Calcular los valores que tendrían  $V_m$  y las concentraciones interiores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  si por algún procedimiento lograra inhibirse la acción de la bomba de iones (equilibrio tipo Donnan)

c) Comparando los resultados anteriores con los valores medidos deducir, para cada una de las especies iónicas permeantes, si interviene o no en el equilibrio una bomba de iones. En los casos positivos, indicar el sentido del flujo bombeado.

ii) Efecto de la permeabilidad de la membrana en el equilibrio electroquímico celular (cuestión conceptual).

a) Suponiendo iguales para todas las células las densidades de flujo de  $\text{Na}^+$  y de  $\text{K}^+$  bombeados (por la bomba de iones) justificar que la diferencia en el valor de  $V_m$  se debe a la

diferente permeabilidad tanto al  $\text{Na}^+$  como al  $\text{K}^+$  de las membranas de células diferentes.

- b) Una mayor permeabilidad de la membrana celular al  $\text{Na}^+$ , ¿aumentaría o disminuiría el valor de  $V_m$ ?
- c) Una mayor permeabilidad de la membrana celular al  $\text{K}^+$ , ¿aumentaría o disminuiría el valor de  $V_m$ ?

### **III. TRABAJO CONTINUADO DE LOS ALUMNOS, con el apoyo del profesor**

#### **A. Foros de debate (aula virtual)**

Aquí es donde se da el verdadero “seminario” entre los alumnos más activos, unos 20 en cada curso, y con el profesor. En la mayor parte de los casos se debaten dudas sobre la hoja de cuestiones propuesta. El profesor revisa los comentarios una vez a la semana, a veces más. Participa con

preguntas cuando un debate se atasca o se resuelve en falso y avala la aclaración de un alumno cuando es éste quien resuelve finalmente la duda.

En 2014-2015, hubo un total de 82 aportaciones “relevantes para el debate” en este tema (unas pocas, en los seminarios presenciales). Los demás alumnos, la mayoría, seguían los debates sin participar: 2.283 visualizaciones.

#### **B. Tutorías presenciales**

Unos días antes de cada uno de los tres exámenes parciales de la parte teórica el profesor convocaba una tutoría presencial para aclarar dudas que no se habían planteado o acabado de resolver en los foros. La asistencia fue siempre numerosa (del orden de la mitad de los alumnos) y duraba varias horas. Algunos alumnos, pocos, solicitaron tutorías individuales.

---