Problem-Based Learning for Numerical Methods Courses in Engineering: Enzymatic Multivariable System Modelling

Aprendizaje basado en Problemas para los Cursos de Métodos Numéricos en Ingeniería: Modelamiento de un Sistema Enzimático Multivariable

Daniel Montes-Gil*, Laura Lasso-Torres*, Carlos Ocampo-López*, Margarita Ramírez-Carmona*, Oscar Muñoz-Blandón*

*Facultad de Ingeniería Química. Escuela de Ingenierías. Universidad Pontificia Bolivariana. Cq 1A N° 70-01, A. A. 56006, Laureles, Medellín, Colombia.

Email: daniel.montes@alfa.upb.edu.co, laura.lasso@alfa.upb.edu.co, carlos.ocampo@upb.edu.co, margarita.ramirez@upb.edu.co, oscar.munoz@alfa.upb.edu.co

Abstract

La Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín, a partir de una metodología basada en problemas en los cursos de métodos numéricos que integra los conocimientos relacionados con las materias del currículo y de los grupos de investigación propone una modalidad de trabajo que tiene por objeto la formación investigativa a través de un trabajo multidisciplinario donde se pueda generar productos de valor que impacten el sector productivo y la academia. En particular, se propuso un problema de modelación para un sistema enzimático, el cual se solucionó con métodos numéricos la predicción de la actividad de una enzima Manganeso Peroxidasa sobre materiales lignocelulósicos a partir de datos experimentales. Esta metodología permitió desarrollar un software para la optimización y el escalado de bioprocesos basados en transformaciones enzimáticas, el cual puede trascender de las aulas para impactar el quehacer de la industria hacia el mejoramiento de los procesos.

Keywords: Aprendizaje Basado en Problemas; Métodos Numéricos; Sistemas Enzimáticos; Modelación; Educación en Ingeniería.

1 Introducción

En los procesos de enseñanza y aprendizaje de la educación a nivel de pregrado se encuentra que hacen falta herramientas transversales a los procesos de ingeniería para abordar realidades complejas dentro del ejercer profesional. Existen áreas de conocimiento que dependen todavía de metodologías exhaustivas y dispendiosas para discernir el comportamiento de los sistemas de ingeniería, o en algunos casos requieren de software especializado poco asequible a muchas facultades y grupos de investigación (Rodríguez-Sandoval & Vargas-Solano, 2010).

Las herramientas desarrolladas en la actualidad no se adaptan fácilmente a algunos procesos específicos o necesidades particulares, como es el caso de la biotecnología, en la cual la predicción del comportamiento se basa en ocasiones en modelos basados en suposiciones y reglas heurísticas alejadas de la realidad.

Desde el año 2008, la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) inicia un proceso de transformación curricular como estrategia para migrar hacia una universidad con énfasis en investigación, buscando una mayor pertinencia de las experiencias en clase y diseñando currículos que faciliten la contextualización, la internacionalización, integralidad, interdisciplinariedad, flexibilidad e interculturalidad de la formación de los discentes (Vicerrectoría Académica UPB, 2010).

Para responder a dicha estrategia, los docentes de la Escuela de Ingenierías de la UPB implementaron una metodología de aprendizaje dentro del curso "Métodos Numéricos para Ingenieros de Procesos", basado en problemas reales de los grupos de investigación para aplicar el conocimiento impartido en el desarrollo de herramientas computacionales que permitan abordar sistemas complejos. En particular, los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química han abordado los problemas que involucran seres vivos o parte de ellos

mediante el estudio y aplicación de la biotecnología (Ocampo-López, Gómez-Agudelo, Castro-Mejía, Ramírez-Carmona, & Rendón-Castrillón, 2013).

En la UPB el curso de métodos numéricos está concebido para desarrollar competencias para fomentar el mejoramiento continuo, el trabajo en equipo, y el diseño. Este se ubica en el quinto semestre de la carrera, al finalizar el ciclo de estudio de las ciencias básicas y en momento que se inicia el ciclo profesional, tal como se muestra en la Figura 1.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Humanismo Cultura y Valores 2	Cristología 2	Línea de formación Humanista II 2	Ética General 1				Mentalidad emprendedora 2		Línea de formación Humanista III 2	
					Ética Profesional 1					
Lenguaje y Cultura 2	Línea de formación Humanista I 2									
Matemática Básica 3	Geometría Vectorial 3	Algebra Lineal 3	Ecuaciones diferenciales 3			Estadística básica 3				
Trigonometría y Geometría 3	Cálculo diferencial 3	Cálculo Integral 3	Cálculo vectorial 3							
Química Básica 3	Química General 4	Química Orgánica I 3	Química Orgánica II 6	Química Analítica 5						
Seminario de Ingeniería Química 2	Fundamentos de mecánica 4	Electricidad y magnetismo 4	Ondas 3							
		Físicoquímica 3	Fenómenos de transporte 3	Termodinámica I 3	Termodinámica II 4	Termodinámica III 4	Diseño de reactores I 3	Diseño de reactores II 4	Ingeniería Electroquímica 4	Práctica 12
				Mecánica de fluidos 4	Transferencia de calor 4	Transferencia de masa I 3	Transferencia de masa II 4	Diseño de procesos I 4	Diseño de procesos II 4	
				Métodos numéricos para Ing Proc 3	Operaciones físicomecanicas I 3	Operaciones físicomecánicas II 2	Introducción a Ingeniería Ambiental 3	Dinámica y control de procesos 5		
				Programación de computadores 2	Balances de materia y Energía 3	Materiales de Ingeniería 3				
					Matemáticas financieras 3	Formulación y evaluación de proyectos 3	Legislación laboral 2			
							Ingeniería Bioquímica 4	Trabajo de grado I 2	Trabajo de grado II 2	
								Optativa I 3	Optativa II 3	
Electiva I 3									Electiva II 3	

1. Se consideran electivas, los cursos tomados en cualquier facultad de la UPB, y optativas la oferta de profundización aprobada por la facultad de Ingeniería Química.
2. El estudiante deberá realizar como requisito para optar al título, un trabajo de acuerdo a la reglamentación de la Facultad.
3. Para optar al grado es requisito cumplir con la exigencia institucional del idioma extranjero.
4. Todo estudiante deberá cursar 2 créditos de ética. Antes del sexto semestre Ética general (1 cr.) y después del sexto Ética Profesional (1 cr).

Ciclo Básico Universitario
Ciclo Básico Disciplinar
Ciclo Profesional
Ciclo Avanzado de Formación

Figura 1: Plan de estudios vigente de la Facultad de Ingeniería Química (I. Q. UPB, 2008)

El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) inicia en la década de los sesenta con la Escuela de Medicina de la Universidad de McMaster en Ontario en Canadá, mediante una estrategia que pretendía acercar a los estudiantes a la realidad de su futura vida profesional a través de grupos que buscan la solución de situaciones problema reales como un reto de curso (Lizett, Olivares, & Heredia, 2012).

A nivel de enseñanza, estas metodologías son pertinentes e imprimen en los estudiantes capacidades para discernir y generar nuevo conocimiento a partir de las experiencias de clase. Varios estudios han comprobado que la retención del conocimiento adquirido después de 24 horas en un estudiante es de 5% para clases magistrales, 50% para discusión en grupo, 75% para experiencias prácticas y 90% por enseñar a otros (Rodríguez-Sandoval & Vargas-Solano, 2010).

Un caso exitoso de la implementación de proyectos basados en problemas para las asignaturas de métodos numéricos fue realizada en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional de Mendoza, en Argentina, en donde la disponibilidad de un modelo pedagógico dinámico y flexible, permitió el desarrollo e implementación de estrategias educativas innovadoras, logrando que los discentes estudiaran sistemas civiles complejos apoyados en un curso de "Análisis Numérico" (Raichman, Totter, & Palazzo, 2013).

El autor también menciona que las actividades generadas a partir de la utilización de las simulaciones computacionales y de los dispositivos experimentales, coherentemente articuladas con el resto de los recursos y actividades disponibles en el modelo pedagógico de la asignatura, promueven el desarrollo de capacidades de visualización, exploración y experimentación, que se traduce en una transformación del diálogo interior del estudiante que redefine, reordena y reelabora el conocimiento con significado, derivando en un enriquecimiento del aprendizaje complejo de los contenidos involucrados en la propuesta (Raichman et al., 2013).

En este trabajo, a partir de una necesidad para la comprensión de un sistema biotecnológico complejo identificado por el Centro de Estudios y de Investigación en Biotecnología (CIBIOT), se inicia un trabajo de modelación con estudiantes de cuarto semestre de las facultades de Ingeniería Química e Informática en el marco del curso de métodos numéricos.

En particular, se propuso un problema de modelación para un sistema enzimático, el cual se solucionó con métodos numéricos utilizando mínimos cuadrados e interpolación polinómica, para predecir la actividad de una enzima Manganeso Peroxidasa (MnP) sobre materiales lignocelulósicos a partir de datos experimentales, evaluando el efecto del tiempo a diferentes niveles de pH. Se encontraron los parámetros de ajuste, para predecir el comportamiento de la Actividad Enzimática en cualquier tiempo a cualquier pH, generando un modelo robusto y realístico. Finalmente se modeló el comportamiento mediante un software basado en Visual Basic (VBA) y Matlab para visualizar y cuantificar el comportamiento de dicho sistema complejo en forma tridimensional.

Esta metodología permitió desarrollar un software para la optimización y el escalado de bioprocesos basados en transformaciones enzimáticas, el cual puede trascender de las aulas para impactar el quehacer de la industria hacia el mejoramiento de los procesos.

2 Metodología

La metodología propuesta en su forma general se fundamenta en el desarrollo de una solución a un problema específico de un grupo de investigación en el marco del curso de Métodos Numéricos, mediante la participación de estudiantes de quinto semestre. Normalmente se organizan grupos de máximo 4 estudiantes, mínimamente uno relacionado con el campo técnico del problema a resolver y otros integrantes interdisciplinarios en otras áreas de la ingeniería. En particular este trabajo muestra la solución de un problema biotecnológico identificado por el grupo de investigación CIBIOT en una tesis de Maestría relacionada con el tratamiento enzimático de un sustrato lignocelulósico, participaron estudiantes de pregrado de Ingeniería Química e Informática.

2.1 Formulación del problema a resolver

El director del grupo de investigación CIBIOT detectó en el desarrollo de un proyecto de maestría en biotecnología la complejidad para modelar un sistema enzimático en el cual interviene la enzima Manganeso Peroxidasa (MnP) sobre materiales lignocelulósicos, un método útil para la extracción de celulosa en residuos vegetales.

Preliminarmente se habían tomado datos experimentales para establecer la cinética enzimática, expresada como Actividad Enzimática (AE), sin embargo no se poseían modelos matemáticos predictivos. A los estudiantes se les reunió en una sesión de dos horas empleando la siguiente agenda:

- Explicación fenomenológica de los sistemas enzimáticos
- Modelos tradicionales de los sistemas enzimáticos
- Entrega de datos experimentales

Adicionalmente se concertaron sesiones de acompañamiento de una hora semanal con investigadores del grupo CIBIOT para acotar la solución numérica del problema a resolver mediante restricciones prácticas derivadas de evidencias experimentales.

2.2 Solución numérica del problema

Se propuso un problema de modelación para un sistema enzimático, el cual se solucionó con métodos numéricos utilizando mínimos cuadrados e interpolación polinómica, para predecir la actividad de una enzima Manganeso Peroxidasa (MnP) sobre materiales lignocelulósicos a partir de datos experimentales, evaluando el efecto del tiempo a diferentes niveles de pH. Se encontraron los parámetros de ajuste, para predecir el comportamiento de la Actividad Enzimática en cualquier tiempo a cualquier pH, generando un modelo robusto y realístico. Finalmente se modeló el comportamiento mediante un software basado en Visual Basic (VBA) y Matlab para visualizar y cuantificar el comportamiento de dicho sistema complejo en forma tridimensional.

2.3 Presentación de los resultados

Los resultados obtenidos durante la simulación numérica son consignados en un documento con formato artículo comprendiendo los siguientes acápites: Introducción, metodología, análisis de resultados, conclusiones y bibliografía.

Adicionalmente los resultados fueron expuestos en una modalidad ponencia ante un panel de profesores de la escuela de ingenierías, participaron expertos en las áreas técnicas del problema a resolver y del área que comprende matemáticas y métodos numéricos. A los estudiantes se les asigna un espacio de 15 minutos de exposición, más 5 minutos de preguntas y retroalimentación.

3 Resultados Obtenidos

El propósito de formación del curso de Métodos Numéricos, como se declara para la Facultad de Ingeniería Química, menciona entre otros aspectos que "La representación matemática de los equipos y sistemas de proceso usualmente encontrados en Ingeniería Química, se realiza mediante modelos basados en principios físicos que resultan en sistemas de ecuaciones algebraicos y/o diferenciales, cuya complejidad algebraica o geométrica impiden el uso de técnicas analíticas clásicas en su resolución. Este curso tiene como propósito aprender algoritmos numéricos que permitan solucionar de manera aproximada problemas matemáticos que resultan de las tareas comunes en la ingeniería de procesos"(F. de I. Q. UPB, 2013). Con esta premisa, sumada al hecho que en los procesos de investigación se presentan fenómenos complejos de analizar desde un punto de vista analítico, se inicia un trabajo que modifica la metodología tradicional de enseñanza de los métodos numéricos hacia un modelo basado en problemas reales.

Desde la formalización de los grupos de trabajo, se propende por generar dinámicas de trabajo interdisciplinario entre estudiantes de ingeniería de diferentes campos, enriqueciendo las discusiones y aplicando los saberes desde diferentes puntos de vista. Esta característica del trabajo del curso de métodos numéricos potencializa el desarrollo de las competencias que involucran trabajo en equipo y mejoramiento continuo. Las experiencias de aprendizaje nos han mostrado como cada miembro dentro del equipo asume un rol de liderazgo en las áreas que competen a su profesión, o en otros casos a distribuir el trabajo en forma equitativa para complementar los resultados obtenidos en pro de una solución innovadora al problema planteado desde un grupo de investigación.

3.1 Modelo de estudio resuelto en el curso de métodos numéricos

Las enzimas lignolíticas que se hallan distribuidas ampliamente entre los hongos causantes de producción blanca: la lignin-peroxidasa (LiP), la manganeso peroxidasa (MnP) y la lacasa (Montoya, 2008); de las cuales la más activa es la Manganeso Peroxidasa (MnP) capaz de catalizar la oxidación de Mn^{2+} a Mn^{3+} en una reacción dependiente de H_2O_2 (Del Carmen, 2011).

Los datos experimentales de AE fueron suministrados a los estudiantes como una tabla en función del pH, y el tiempo en la forma AE(pH,t). Se realizó la búsqueda de un modelo matemático que describiera el comportamiento general del sistema en forma precisa. Para la búsqueda del modelo matemático se emplearon 40 modelos con una tendencia similar a los datos provistos, empleando representaciones bidimensionales con parámetro constante el pH. El modelo genérico que mejor se ajustó a los datos se muestra en la Ecuación 1 y en la Figura 2,

$$AE = \frac{a}{\left(1+\left(\frac{t-b}{c}\right)^2\right)} + d \quad (1)$$

Donde:

AE: Actividad Enzimática de la MnP a pH constante (UI)

a,b,c,d: Parámetros de ajuste

t: Tiempo (horas)

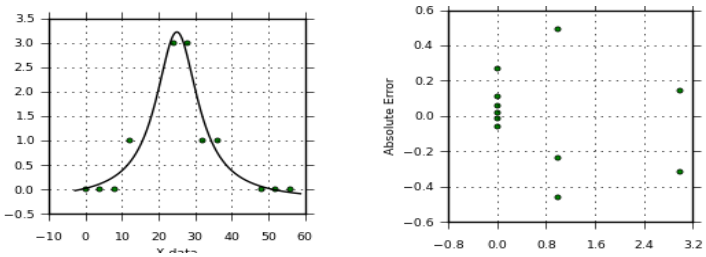
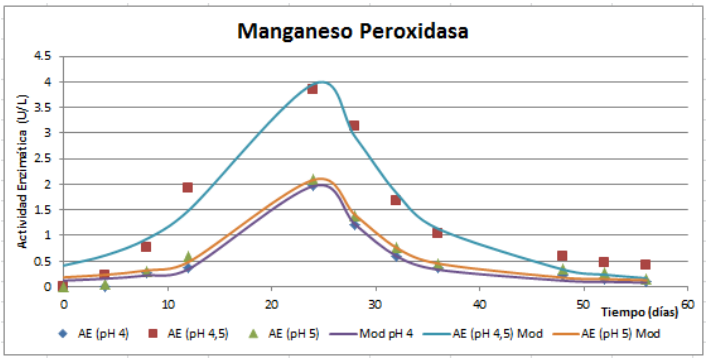


Figura 2: Ajuste del modelo matemático para AE (pH=4, t). Error cuadrático total 0.723

Para el procedimiento de ajuste de la AE a diferentes valores de pH se utilizó Solver, una herramienta de optimización de MSExcel, minimizando la suma de desviaciones cuadráticas mediante la modificación de los parámetros del modelo (Steven & Raymond, 2007). Los resultados se muestran en la Figura 3.



	a	*b*	*c*	*d*
pH 4	1,93	23,84	5,21	0,03
pH 4,5	4,12	22,82	8,53	-0,09
pH 5	2,03	23,68	6,01	0,06

Figura 3: Ajuste del modelo matemático para AE (pH, t) a diferentes valores de pH y parámetros encontrados

Con los parámetros hallados con Solver se plantearon cuatro polinomios, los cuales permitieron predecir el comportamiento de la AE para cualquier tiempo a cualquier pH, dichos polinomios se muestran en las Ecuaciones 2-5 y los valores de los parámetros se resumen en la Tabla 1.

$$a(pH)=a_1(pH)^2+a_2(pH)+a_3 \quad (2)$$

$$b(pH)=b_1(pH)^2+b_2(pH)+b_3 \quad (3)$$

$$c(pH)=c_1(pH)^2+c_2(pH)+c_3 \quad (4)$$

$$d(pH)=d_1(pH)^2+d_2(pH)+d_3 \quad (5)$$

Tabla 1: Parámetros de ajuste a_i, b_i, c_i y d_i obtenidos para predecir el comportamiento del modelo a diferentes pH

i	*a*	*b*	*c*	*d*
1	-8,57	3,88	-11,67	0,55
2	77,20	-35,02	105,78	-4,91
3	-169,79	101,92	-231,21	10,89

Para optimizar el procedimiento anterior se desarrolló un software en Visual Basic (VBA) en el cual se ingresan datos experimentales de AE (pH, t) y mediante un botón se genera automáticamente el ajuste de parámetros.

Como resultado final se generó un código adaptado para Matlab ®, capaz de generar la superficie donde se puede analizar el comportamiento completo de la actividad enzimática de la MnP, los resultados se muestran en la Figura 4.

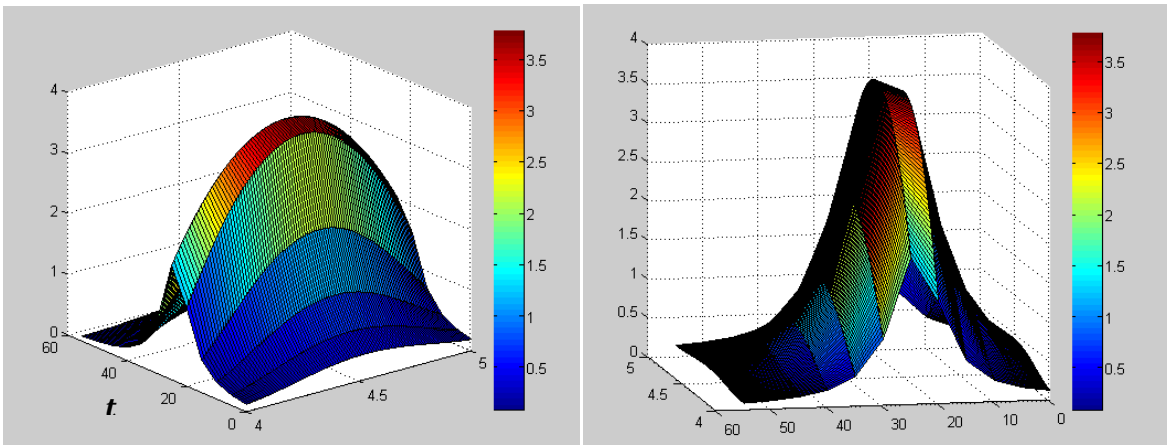


Figura 4: Ajuste del modelo matemático para la Actividad Enzimática de la MnP desarrollado en el Curso de Métodos Numéricos

3.2 Metodología basada en problemas en el curso de métodos numéricos

Semestralmente se matriculan en promedio 120 estudiantes en métodos numéricos en la Escuela de Ingenierías. El trabajo se desarrolla normalmente en casa, con la tutoría semanal de 1-2 horas por parte de un docente. El trabajo se asigna durante el primer mes del curso de métodos numéricos, orientándolo a problemáticas reales de los grupos de investigación de la Universidad.

Una metodología basada en problemas apropiada requiere también una evaluación diferente. Es por ello que se desarrolló una evaluación final de curso mediante exposiciones de 20 minutos ante un panel de profesores e investigadores, los cuales revisan la pertinencia de tema abordado, la rigurosidad en la solución numérica, así como las aplicaciones potenciales de los resultados obtenidos, dando un peso proporcional a cada ítem.

Este cambio metodológico permite la generación de productos de valor útil para el sector productivo y académico, así como para facilitar el estudio de los sistemas de ingeniería complejos, abriendo una puerta para que los estudiantes de ingeniería realicen un proceso de aprendizaje pertinente y alineado con los grandes retos del desarrollo de la región, dando cuenta del lema universitario "Innovar para Transformar". Entre los productos potenciales que esta metodología permite generar, se encuentra el desarrollo de software protegible por derechos de autor, la redacción de artículos científicos y de divulgación publicables en revistas internacionales indexadas y ponencias en eventos académicos.

Se resalta la participación de los estudiantes de pregrado en problemas particulares que hacen parte de proyectos de maestría y doctorado, lo que genera mayor vinculación y paulatinamente una perdida del miedo a lo desconocido, mas aun cuando el problema a resolver no está ligado directamente al programa profesional del estudiante. Se ha evidenciado que el desarrollo de estos proyectos termina vinculado al estudiante al grupo de investigación, lo que redunda en una formación investigativa pertinente desde el pregrado. Por ejemplo al semillero de investigación del grupo CIBIOT, el cual está adscrito a la Facultad de Ingeniería Química, se han vinculado en los últimos 2 años estudiantes de ingeniería aeronáutica, industrial, informática y mecánica.

4 Conclusión

La metodología basada en problemas propuesta desde el curso de Métodos Numéricos de la Universidad Pontificia Bolivariana, fortalece el proceso de formación investigativa, logra desarrollar con los estudiantes soluciones pertinentes a los retos que desde la investigación aplicada requieren el análisis de sistemas

complejos, para dar solución a problemas en la industria, y crear estrategias para el desarrollo de productos de valor desde el pregrado.

En el caso de estudio presentado los estudiantes de pregrado lograron generar un modelo predictivo para la actividad enzimática de la MnP sobre residuos lignocelulósicos, para dar solución a un problema de modelación a nivel de maestría, lo que permite potencialmente el desarrollo de un software para la optimización de procesos enzimáticos aplicado a la industria.

Referencias

Del Carmen, E. (2011). Manganeso peroxidasa enzima producida por phanerochaete chrysosporium. Ciudad de México.

Lizett, S., Olivares, O., & Heredia, Y. (2012). Desarrollo del pensamiento crítico en ambientes de aprendizaje basado en problemas en estudiantes de educación superior. Revista Mexicana de Investigación Educativa, 17, 759-778.

Montoya, S. (2008). Actividad enzimática, degradación de residuos sólidos orgánicos y generación de biomasa útil del macromiceto grifola frondosa. Universidad Nacional de Colombia. Universidad Nacional de Colombia - Manizales.

Ocampo-López, C., Gómez-Agudelo, D., Castro-Mejía, M., Ramírez-Carmona, M., & Rendón-Castrillón, L. (2013). Desarrollo de una Herramienta Computacional Aplicada al Escalado de los Bioprocesos. Ingeniar Internacional, 971-979.

Raichman, S., Totter, E., & Palazzo, G. (2013). HACIA UNA MEJORA EN LA CALIDAD DEL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA : UN. Mecánica Computacional, XXXII(1), 19-22. Argentina.

Rodríguez-Sandoval, E., & Vargas-Solano, É. M. (2010). Evaluación de la estrategia: “aprendizaje basado en proyectos.” Educación y Educadores, 13(1), 13-25.

Steven, C., & Raymond, P. (2007). Métodos numéricos para ingenieros (5th ed.). Mexico.

UPB, F. de I. Q. (2013). Transformación Curricular: Carta del Curso Métodos Numéricos para Ingenieros de Procesos. Medellín.

UPB, I. Q. (2008). Proyecto Educativo: Programa de Ingeniería Química. Medellín.

Vicerrectoría Académica UPB. (2010). Orientaciones para la transformación curricular. Universidad Pontificia Bolivariana.