



## Hacia una historia epistemológica de la Química Organometálica: interpretación filosófica desde Larry Laudan (I)

*Towards an epistemological history of Organometallic Chemistry: philosophical interpretation from Larry Laudan (I)*

Alexander Cárdenas-Acero<sup>1</sup>, Carlos J. Mosquera<sup>2</sup> y Edwin A. Baquero<sup>3</sup>

### Resumen

Diversos autores han demostrado que un enfoque histórico de la enseñanza de la química puede ser complementado desde una visión de la filosofía de la ciencia. Esto permite abrir el panorama de comprensión de lo que implica hacer química y abordar así aspectos de esta disciplina como una empresa dinámica en constante cambio y evolución. En tal sentido, este artículo persigue hacer una interpretación filosófica de la historia de la Química Organometálica desde las posturas de Larry Laudan. Para lograr este objetivo, se realiza un análisis de los modelos clásicos de cambio científico (Kuhn, Lakatos) como antecedentes del modelo de Tradiciones de Investigación (TI) de Laudan. Una vez expuestas las generalidades de dicho modelo, se presenta la definición formal de la Teoría de Coordinación como una TI que orienta la disciplina objeto del estudio; de tal manera que se hace posible el desarrollo de un análisis a nivel macro-teórico, en términos de Laudan, de dicha tradición. Finalmente, se presentan algunos comentarios a manera de conclusiones y perspectivas para futuras reflexiones.

### Palabras clave

Modelo Filosófico, Larry Laudan, Química Organometálica, Interpretación Filosófica, Historia de la Ciencia.

### Abstract

An historical approach to teaching chemistry can be enhanced by integrating a philosophical perspective of science. This approach broadens students' understanding of the evolving nature of chemistry and how it is continually changing. This article aims to present a philosophical interpretation of the history of Organometallic Chemistry through Larry Laudan's standpoint. To achieve this goal, the paper analyzes classical models of scientific change (Kuhn, Lakatos) and their influence on Laudan's Research Traditions (RT) model. After outlining the generalities of the RT model, the paper presents the formal definition of the Coordination Theory as an RT that shapes the discipline under study. Subsequently, the article provides a macro-theoretical level analysis of this tradition from Laudan's perspective. Finally, the paper concludes with comments and future perspectives for reflection.

### Keywords

Philosophical Model, Larry Laudan, Organometallic Chemistry, Philosophical Interpretation, History of Science.

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Químico. Universidad Nacional de Colombia. Coordinador de Investigación e Innovación Colegio de la Salle, Bogotá.

<sup>2</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Profesor Facultad de Ciencias y Educación (Programas de Doctorado en Educación, Maestría en Educación y Licenciatura en Química, Colombia).

<sup>3</sup> Grupo de Estado Sólido y Catálisis Ambiental (ESCA), Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

## Introducción

A la hora de abordar la enseñanza de la química, pareciera que los conocimientos que se comunican dentro del aula se presentan como verdades impuestas e inmutables (Garritz, y otros, 2013). Así, el proceso de enseñanza-aprendizaje se consolida en una estrategia de replicación de un saber preestablecido que debe ser aprendido al pie de la letra. Sin embargo, hoy se hace fundamental comprender el conocimiento científico en su contexto, es decir, desde un enfoque histórico (Erduran & Mugaloglu, 2014), de tal manera que sea posible entender realmente la forma en la que se llevó a cabo el desarrollo de estos conceptos, fórmulas y reacciones (Van Driel, De Vos, & Verloop, 1998) que han consolidado a la química como la ciencia que hoy día conocemos. Esto abarca todas sus ramas, incluida la química organometálica, una rama de la química inorgánica relativamente nueva (Reisner, y otros, 2012) que se encarga del estudio, la síntesis y reactividad de compuestos químicos que poseen al menos un enlace entre un átomo de carbono de un ligando y un metal.

En este sentido, abordar esta área del conocimiento desde un enfoque histórico implica reconocer que la consolidación de la química organometálica como campo del saber se ha dado a través de una serie de procesos que le han permitido el desarrollo conceptual y experimental. En la medida en que dichos procesos de desarrollo histórico y cambio científico se abordan en el aula, es posible generar transformaciones significativas (Garritz, y otros, 2013) dentro de la enseñanza de la química. En otras palabras, al comprender dicha disciplina desde su historia, es posible reconocerla como una empresa humana (De Berg, 2014), que posee fortalezas y limitaciones, con una serie de procesos dinámicos en los que se evidencian las interrelaciones existentes entre los diversos acontecimientos históricos que la han constituido.

El problema radica en que una comprensión integral de esta disciplina requiere de una interpretación filosófica, pues como bien lo afirma Lakatos (1971), *‘la filosofía de la ciencia sin historia es algo vacío; la historia de la ciencia, sin filosofía, está ciega’*. En ese sentido, se hace necesario pensar en un modelo (Villani, 1992) para comprender los cambios científicos que caracterizan la historia de la química organometálica, con la finalidad de emplearla de manera adecuada para la enseñanza de esta asignatura. Esto con el fin de motivar a los jóvenes universitarios al aprendizaje de la materia, en tanto que se muestra la relevancia de los diversos conocimientos teóricos presentados dentro de la clase en relación con el contexto específico (Colombo de Cudmani, 1997) en el que se consolidaron.

En consonancia con lo anterior, este trabajo presenta una interpretación filosófica de la historia de la química organometálica desde el modelo de progreso científico de Larry Laudan. Puesto que el análisis realizado es extenso, se ha optado por presentarlo en dos artículos complementarios, de manera análoga a la estructura de análisis filosófico propuesta por Laudan (1977). Así pues, el primero de ellos se centra en las generalidades del modelo y la comprensión de la Teoría de Coordinación como Tradición de Investigación (TI) en la que se inscribe la química organometálica; cuestión necesaria para reconocer el marco general del progreso científico de la disciplina de interés. Una vez se comprenda el progreso de la TI a nivel macro-teórico; el segundo artículo permitirá interpretar, de acuerdo con el modelo filosófico seleccionado, la evolución de las cinco líneas de acción propias de la química organometálica (nivel micro-teórico). A continuación, se presenta la primera parte del análisis mencionado.

## Marco Teórico

### Modelos de Progreso Científico

Desde la década de 1970, han sido diversas las propuestas y alternativas que han surgido para comprender el fenómeno de cambio científico (Gráfico 1). Con la publicación de su libro “La Estructura de las Revoluciones Científicas”, Thomas Kuhn (1971) propone una visión renovadora sobre lo que implican los cambios científicos dentro de la ciencia. Así, desarrolla un modelo basado en unidades de amplia escala, a las que denomina paradigmas, en las cuales se desarrolla la ciencia normal. Pero, en un determinado momento, llega un periodo de crisis que hace tambalear los principios fundamentales de la visión del mundo predominante en una época. De esta manera, se presenta un proceso de revolución científica que implica una ruptura total y abrupta entre el viejo y el nuevo paradigma, la cual es empíricamente más adecuada. Una vez este nuevo paradigma es aceptado (ciencia madura) se entra en un nuevo periodo de ciencia normal en el cual las teorías base son inalterables e inmunes a críticas.



**GRÁFICO 1.** Generalidades de los modelos de progreso científico propuestos por tres autores. Fuente: Elaboración propia.

Aunque la propuesta sobre el progreso científico planteada por Kuhn genera ruptura con la comprensión tradicional y rescata la historicidad del proceso, se queda corta a la hora de pensar en la posibilidad de cambios intra-paradigmáticos que no implican una ruptura total con el paradigma anterior o el hecho de que el periodo de crisis no puede ser producto de factores internos. Lo que es aún más preocupante, no deja claro cómo se lleva a cabo el cambio científico. Por el contrario, lo plantea como la preferencia no justificada, irracional o incluso sentimental, por una nueva visión paradigmática (Velasco, 1995). De allí que sea considerado como un filósofo no racionalista de la ciencia. A pesar de esto, el trabajo de Kuhn inspiró a una generación posterior a mejorar la visión sobre el cambio científico desde una interpretación filosófica.

Los integrantes de esta generación fueron catalogados como filósofos racionalistas de la ciencia, pues intentaron dar una explicación razonable de por qué se da un cambio científico dentro de la historia de una disciplina. Es el caso de Imre Lakatos (1971), quien, basado en los planteamientos de Kuhn, desarrolla un nuevo modelo de cambio científico centrado en una serie de supra unidades conocidas como programas de investigación. Estos comprenden un conjunto esencial de principios que no pueden ser abandonados sin abandonar el programa, y una serie de teorías que le responden. Cabe decir que Lakatos plantea el progreso científico en función del crecimiento empírico de la tradición, lo que implica que, a mayor contenido empírico de una teoría sobre la otra, mayor capacidad de responder al cambio dentro de la disciplina.

Sin embargo, este modelo de progreso exclusivamente empírico posee algunos inconvenientes. El hecho de que sea imposible aceptar que existan cambios en los principios fundamentales de un programa de investigación, a menos que se lleve a cabo un cambio global, implica que no pueden existir dos teorías diferentes en un mismo programa, a menos que una contenga a la otra; pero sí dos programas de investigación que coexisten en un periodo histórico específico. Esta serie de problemas lleva a pensar en un modelo alternativo que, siguiendo la línea de los filósofos racionalistas, permita comprender el desarrollo de una historia de la química organometálica desde el progreso científico.

### ***La Propuesta de Larry Laudan***

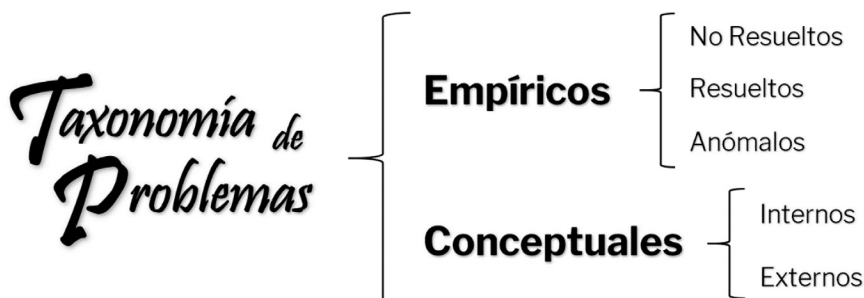
Tomando como base los planteamientos de Kuhn y Lakatos, Larry Laudan propone un modelo de progreso científico basado en la solución de problemas científicos como eje orientador, pues, para el autor, *"la ciencia es, esencialmente, una actividad de resolución de problemas"* (Laudan, 1977, pág. 11). Si bien no se reduce a ello, pensarla desde este punto permite reconocer lo que le es verdaderamente característico. En este sentido, el principal objetivo de la ciencia es proponer teorías que, como bien lo afirma Laudan (1977), *"maximicen el número de problemas empíricos resueltos y minimicen la aparición de anomalías o problemas conceptuales"* (pág. 66) dentro de cualquier disciplina.

Ahora bien, este modelo está basado en el análisis del progreso científico a partir de la evaluación y comparación de teorías. Laudan comprende el concepto de teorías desde dos perspectivas. Por un lado, como un conjunto de doctrinas específicas (hipótesis, axiomas, principios) que pueden ser utilizadas para hacer predicciones y dar explicaciones de fenómenos naturales. Tómese como ejemplo la teoría de las proporciones múltiples propuesta por Dalton. Por otro lado, como un conjunto de doctrinas generales (teoría atómica, teoría de la relatividad), a las que se suscriben otras teorías específicas, las cuales están histórica y conceptualmente relacionadas. A estas Laudan les da el nombre de Tradiciones de Investigación (TI), y no son otra cosa que un conjunto de directrices generales sobre las entidades y procesos de un campo de estudio, sobre los métodos apropiados que se utilizan dentro de la investigación en este terreno para la solución de problemas y la construcción de teorías bien fundamentadas (Laudan, 1978, pág. 374). En otras palabras, es un conjunto de principios conceptuales en cuanto que especifica los tipos de entidades fundamentales que existen; metodológicos, pues especifica procedimientos o métodos de investigación en los que se enmarca la TI; y axiológicos, en cuanto que plantea las directrices teleológicas y los objetivos finales que se esperan obtener.

Cabe decir que, esas teorías más generales (TI) son las importantes a la hora de comprender el progreso científico, pues están inevitablemente relacionadas con la resolución de problemas. De allí que, en la medida en que seamos capaces de reconocer la eficiencia de una teoría frente a la solución de ciertos problemas, será posible comprender la historia de la ciencia desde una visión más racional. De esta manera logra un cambio radical, pues no plantea el progreso en términos de las teorías más racionales, sino la racionalidad en términos de la selección de teorías más progresivas.

Pero, ¿cómo reconocer esa progresividad? ¿De qué manera se puede saber cuál es la mejor teoría o TI? Para ello, Laudan propone la posibilidad de realizar una evaluación racional de las teorías. De esta manera, haciendo un rescate de la racionalidad científica, una lectura desde el progreso no acumulativo y planteando la posibilidad de comparar TI coexistentes, Laudan logra romper con los defectos que los modelos anteriores poseían.

Para ello, propone una taxonomía de problemas (Gráfico 2) en la que caracteriza los diversos tipos de problemas que existen en las Tradiciones de Investigación y que motivan el proceso de cambio científico. Dicha taxonomía plantea dos tipos generales de problemas: los empíricos, que abarcan aquellos hechos que nos parecen extraños dentro de una disciplina y hasta el momento no poseen explicación alguna; y los conceptuales, los cuales surgen dentro de una teoría en términos de sus inconsistencias, lagunas, contradicciones o conflictos teóricos.



**GRÁFICO 2.** Taxonomía de problemas propuesta por Larry Laudan. Fuente: Elaboración propia.

Desde esta perspectiva, las teorías o TI no se rechazan simplemente por la acumulación o presencia de anomalías o problemas empíricos no resueltos, sino que requieren de una comparación en la cual se encuentren buenas razones (aquellas que permiten la consecución de los objetivos de la ciencia) para elegir cierta  $TI_1$  sobre otra  $TI_2$ . Este análisis dependerá de dos procesos, uno sincrónico (suficiencia momentánea) y otro diacrónico (tasa de progreso), en donde el segundo tiene un mayor peso que el primero a la hora de determinar, racionalmente, cuál es la tradición de investigación más progresiva y el porqué.

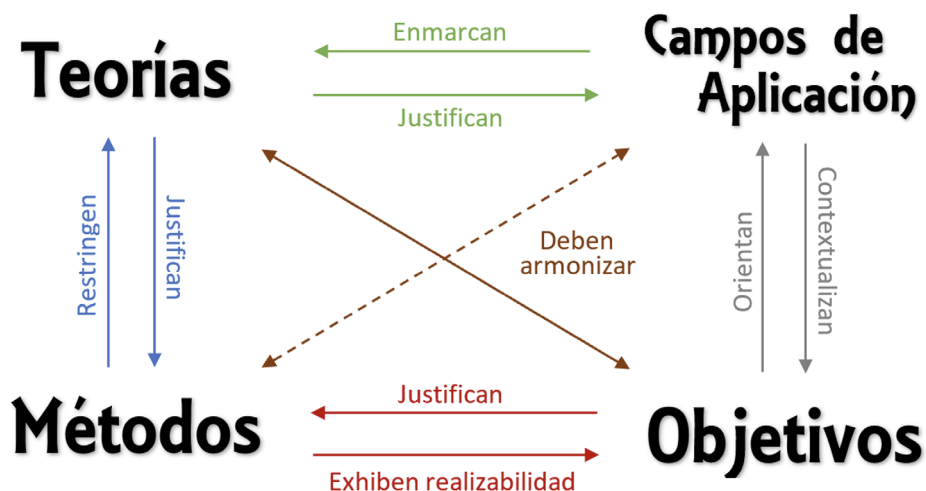
Cabe decir que este proceso de selección entre teorías específicas o tradiciones de investigación no se da, necesariamente, dentro de lo que Kuhn consideraba una Revolución Científica. Dentro de sus planteamientos, Laudan afirmará que los métodos, las teorías y los objetivos son separables y pueden avanzar de diversas maneras y a diferentes ritmos, es decir, no se requiere de un cambio total en los fundamentos de una TI para lograr un progreso dentro de la ciencia, a diferencia de lo que planteaban Kuhn y Lakatos. De allí que Laudan (1977) afirme que “*las revoluciones científicas no son tan revolucionarias y los periodos de ciencia normal no son tan normales*” (pág. 134). En otras palabras, la ciencia no progresa únicamente cuando se produce un cambio radical entre dos visiones científicas distintas, sino que en su propia historicidad se van dando cambios sucesivos que permiten comprender un progreso continuo dentro de cualquier disciplina.

### **Antecedentes en Educación**

Ahora bien, al realizar una revisión documental, han sido pocos los esfuerzos que se han llevado a cabo para realizar una interpretación filosófica de la historia de la química en pro de una mejora del aprendizaje de esta área del conocimiento. Tómese como ejemplo la relectura del concepto de combustión, desde la perspectiva de Kuhn, realizada por Cabrera y Zambrano (2009), o la interpretación de la evolución de la idea de afinidad electrónica, desde los planteamientos de Toulmin, realizada por Estany e Izquierdo (1990). Mucho más escasos son los trabajos relacionados que emplean el modelo de Larry Laudan.

Si bien se ha utilizado como análogo del cambio conceptual en la enseñanza de las ciencias, como en los trabajos de Duschl y Gitomer (1991), Villani (1992) o Cudmani, Pesa y Salinas (1999); la aplicación del modelo de Laudan ha sido poco explorada en la interpretación de fenómenos históricos y tiende a realizarse de manera poco sistemática. Es el caso de Estany (1998), quien realiza la reconstrucción histórica de diversos casos científicos utilizando el discurso como estrategia para implementar el modelo de Laudan, o el de Seiffert Santos y Borin da Cunha (2019) quienes estudian la relación del modelo con la educación no formal en Brasil.

Como respuesta a esta falta de aplicaciones concretas de los planteamientos de Laudan, se presenta esta interpretación de la historia de la química organometálica desde una adaptación de su modelo de cambio científico. En este sentido, la historia de la disciplina, inscrita en la Teoría de Coordinación como Tradición de Investigación (TI), se analizó mediante el Modelo Expandido de Cambio Científico (Gráfico 3), el cual permite observar las transformaciones teóricas, metodológicas, axiológicas y aplicativas de esta disciplina, intentando ser fieles a la forma en la que Laudan propone el análisis de la evolución de la Tradición de Investigación (TI) (1977) y sus correspondientes teorías dentro de la ciencia.



**GRÁFICO 3.** Modelo Expandido de Cambio Científico a partir de los planteamientos de Laudan. Fuente: Elaboración propia.

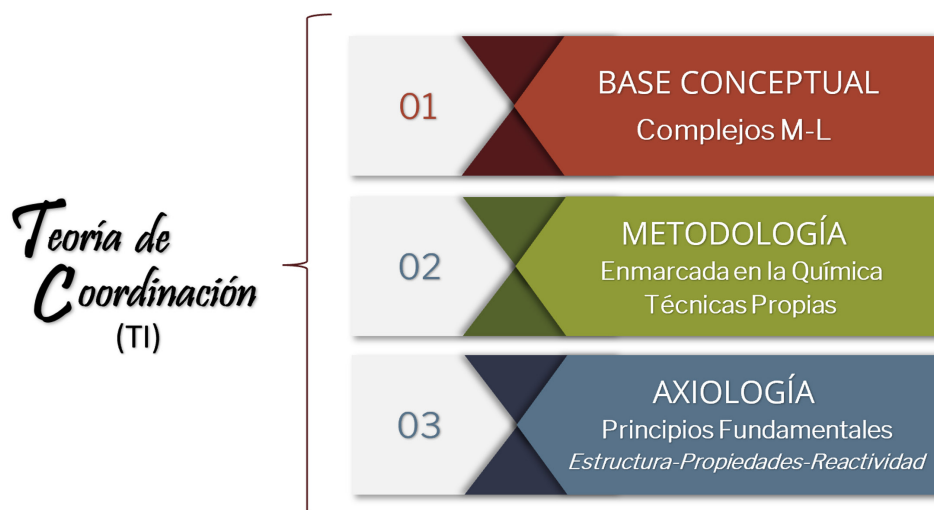
## Análisis y Discusión

### *Teoría de Coordinación como una Tradición de Investigación*

Puesto que nuestro interés aquí es lograr una lectura de la química organometálica desde una perspectiva filosófica, es esencial identificar la tradición de investigación en la cual nos movemos. De acuerdo con los trabajos revisados (Werner H., 2009), la historia de esta rama de la química está caracterizada por el concepto de coordinación. De allí que pensar en una Teoría de Coordinación, como la TI que nos convoca sea algo histórica e intuitivamente correcto. Para fundamentar esta afirmación revisemos las tres características esenciales de toda TI (Gráfico 4). En primer lugar, y la menos complicada de identificar, es que toda TI se extiende a través de un largo periodo de tiempo (Laudan, 1977). En este sentido, el inicio de la teoría de coordinación se remonta a finales del siglo XIX de la mano de Werner, sus estudios sobre las sales de metal amonio y sus postulados revolucionarios permitieron comprender el enlace M-Ligando y abrieron el camino para una nueva rama dentro de la

química (Ramberg, 2016). Y aunque a lo largo del último siglo la TI ha sufrido modificaciones, se mantiene estable a diferencia de otras teorías específicas que pertenecen al dominio científico en el que se desarrolla.

En segundo lugar, una TI posee un conjunto de teorías que la ejemplifica y parcialmente la constituye, ya sean contemporáneas o sucesivas (Laudan, 1977). Tómese como ejemplo las diversas teorías específicas que desde el descubrimiento de la Sal de Zeise, fueron evolucionando para comprender la forma en la cual se coordinaba una olefina a un metal (Werner, H. , 2009). Esta teoría pertenece a la TI y la ejemplifica, puesto que se desarrolla dentro de un campo de conocimiento específico. En tercer lugar, toda TI posee una serie de compromisos conceptuales, metodológicos y axiológicos que la distinguen de las otras (Laudan, 1977). Así pues, la Teoría de Coordinación, define unas entidades propias de su dominio (los complejos M-Ligando) y las interacciones que entre ellos pueden darse. De allí que las diversas líneas de acción (M-CO, M-Olefina, M-Alquilo, M-Carbeno, Tipo Sándwich), respondan a la TI general. Además, la TI posee una serie de pautas metodológicas y técnicas propias que están inscritas dentro de la metodología propia de la química. No menos importante, esta TI desarrolla una axiología propia al considerar unos principios fundamentales en términos del estudio de la estructura, propiedades y reactividad de las entidades definidas. Estos principios marcan, en palabras de Laudan (1984), los valores o propósitos que la TI quiere.

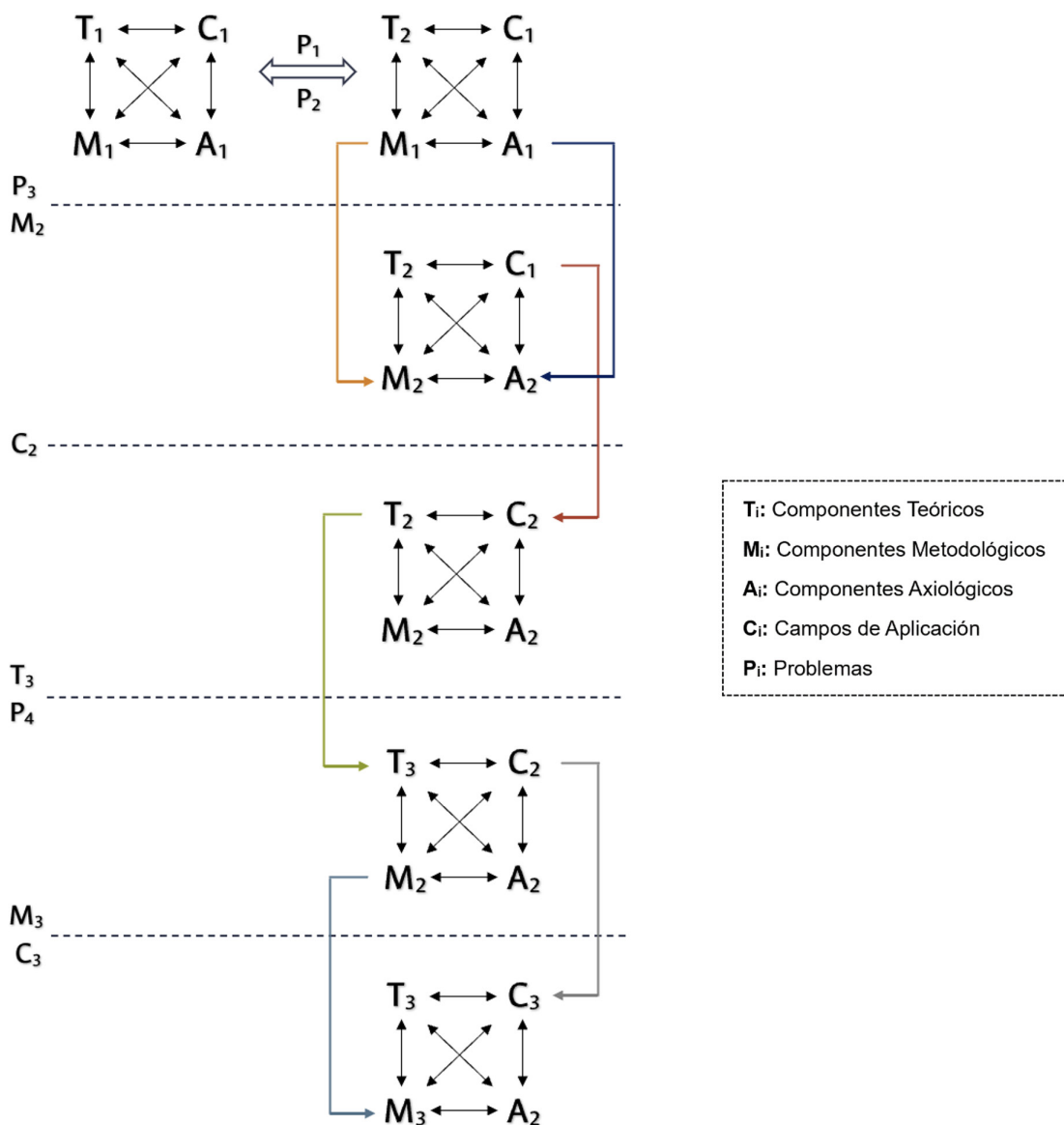


**GRÁFICO 4.**  
Compromisos de la Teoría de Coordinación como Tradición de Investigación (TI).  
Fuente: Elaboración propia.

### Análisis Macro-Teórico

Para Laudan, la evolución de una TI puede darse de dos formas. Una de ellas es mediante el cambio en los principios fundamentales de la tradición. A esto nos referimos aquí cuando planteamos el análisis macro-teórico que se presenta a continuación. De esta manera, mediante los planteamientos de Laudan, pretendemos evidenciar la evolución de la Teoría de Coordinación desde una perspectiva general. Para ello se sigue el esquema del Gráfico 5 que muestra la evolución de la TI, en donde las letras T, M, A y C indican los componentes teóricos, los metodológicos, los axiológicos y los campos de aplicación, respectivamente. Esto se realiza en consonancia con el Modelo Expandido de Cambio Científico (Gráfico 1). Se coloca un subíndice (i.e.  $T_i$ ) que acompaña cada letra para explicitar el avance progresivo de los diversos componentes constitutivos de la TI. Además, se indican los problemas asociados con la letra P y su correspondiente subíndice.

Es indiscutible que la consolidación de la TI se dio a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX. Durante este periodo, surgieron dos propiedades peculiares cuya explicación no se había desarrollado, a saber, la pérdida de las propiedades básicas de los  $\text{NH}_3$  en las sales de amonio al unirse a un Co ( $P_1$ ) (Blomstrand, 1869); y el hecho de que en algunas sales, como en el amarillo Luteo, los Cl podía precipitarse en forma de AgCl, mientras que en otras (verde Praseo) no ( $P_2$ ) (Kauffman, 1977). En aquél entonces existía una Tradición de Investigación ( $TI_1$ ) apropiada por un grupo de científicos que reposaba en las teorías de Berzelius (1830), Frankland (1849) y Kekulé (1865).



**GRÁFICO 5.** Evolución de la Teoría de Coordinación ( $TI_2$ ) desde el modelo de progreso científico de L. Laudan. Fuente: Elaboración propia.

Desde esta perspectiva, las sales respondían a una estructura que provenía de la química orgánica, en donde se trabajaba a partir de una analogía con las cadenas de carbono y se realizaba desde una interpretación de la valencia convencional ( $T_1$ ). La finalidad de esta  $TI_1$  era comprender el comportamiento de las sales de amonio ( $A_1$ ) a partir



de una serie de metodologías particulares que respondían a la época ( $M_1$ ), especialmente desde una perspectiva cuantitativa en donde los métodos conductimétricos, el estudio de puntos de congelación y el desarrollo de la espectroscopía básica desde Fresnel y Young eran esenciales. Además, respondía a un conjunto de campos de aplicación propios como lo eran la investigación científica y la industria ( $C_1$ ).

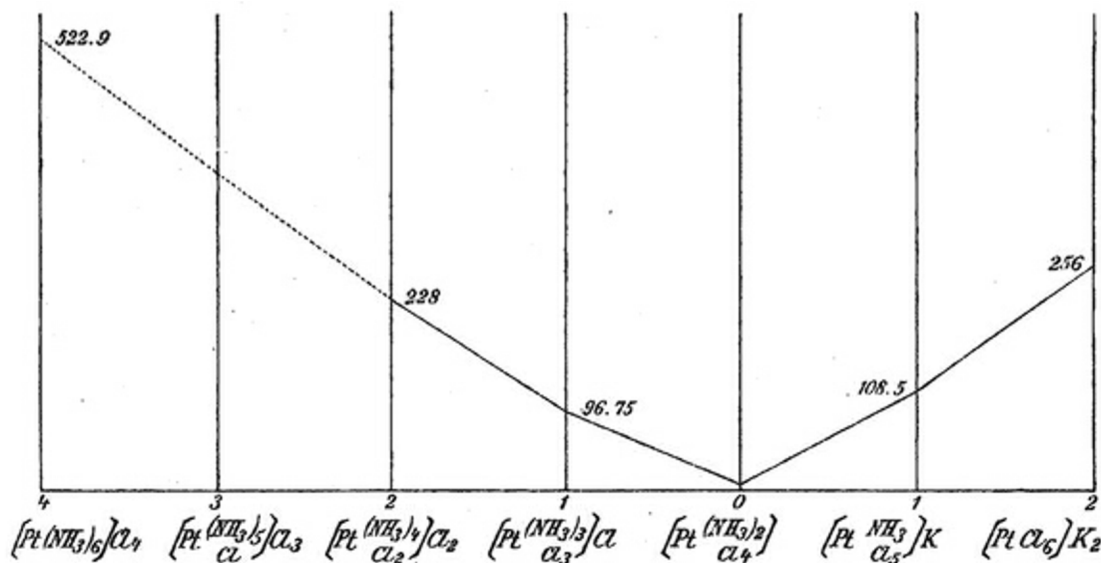
A esta  $TI_1$  respondía Sophus Mads Jørgensen, quien se dedicó al estudio de dichas sales (Kauffman, 1977). Sin embargo, en un documento de 63 páginas titulado “*Contribution to the Constitution of Inorganic Compounds*”, Alfred Werner (1893) planteaba una nueva forma de abordar estas sales que tanto interés ocasionaban. A pesar de estar adscrita en  $M_1$ ,  $A_1$  y  $C_1$ , los planteamientos de Werner dentro de este documento divergen radicalmente de la propuesta de Jørgensen. A partir de diversos estudios experimentales (Ramberg, 2016), propuso una estructura octaédrica de los compuestos, a diferencia de la linear de su contraparte; y planteó lo que él denominó número de coordinación, el número de grupos unidos al metal ( $T_2$ ). Este conjunto de  $T_2$ ,  $M_1$ ,  $A_1$  y  $C_1$  constituyó lo que sería la Teoría de coordinación ( $TI_2$ ).

Pero antes de continuar con el análisis comparativo es importante aclarar una cuestión con respecto al documento de Werner. El hecho de que haya pensado en un octaedro como primera opción parece algo arbitrario, pues existen otras estructuras que poseen una configuración similar (cúbica, pirámide pentagonal). Sin embargo, diversos estudios (Ramberg, 2016) le permitieron concluir que esta geometría maximiza la afinidad del metal por los seis grupos que tiene a su alrededor, de manera que todos los grupos  $NH_3$  recibían la misma “cantidad de afinidad”. Lo anterior muestra esa influencia innegable de planteamientos como los de Berzelius o Frankland. De allí que sea posible afirmar junto a Laudan que un científico puede moverse en varias tradiciones de investigación.

Ahora bien, tanto  $P_1$  como  $P_2$ , presentados anteriormente, son problemas empíricos. Sin embargo, se consideran problemas resueltos, pues tanto  $T_1$  como  $T_2$  son capaces de dar solución a estas cuestiones a pesar de que lo hagan de manera diferente. Para poder tomar una decisión racional sobre cuál era una mejor aproximación a la verdadera respuesta de los problemas planteados, fueron necesarias dos cosas, tal como se ve en el esquema. En primer lugar, el surgimiento de un conjunto de problemas ( $P_3$ ) considerados como anomalías. Estamos refiriéndonos a las predicciones de nuevas estructuras (Ramberg, 2016) que eran necesarias en aquella época y la inconsistencia (Gráfico 6) que consistía en la disminución y posterior aumento de la conductividad eléctrica a medida que se variaban los grupos unidos a un metal dentro de una serie. Estos problemas son considerados como anomalías, pues sólo la  $TI_2$ , propuesta por Werner, era capaz de dar una explicación completa del fenómeno. El hecho de que  $TI_2$  haya resuelto este problema, al igual que los demás que  $TI_1$  resolvía, la convirtió en una opción racional aceptable que promovía el progreso científico. En segundo lugar, el desarrollo de metodologías novedosas ( $M_2$ ), como la recristalización fraccionada implementada en Francia (Brunner, 1969) o el descubrimiento de los Rayos X realizado por Wilhelm Röntgen (1878) en Alemania, permitió la comprobación de las estructuras que la  $TI_2$  predecía lo que terminó de dar validez a la nueva tradición que surgía.

A pesar de que Jørgensen siguió refutando los planteamientos de Werner, la  $TI_2$  fue sentando sus bases poco a poco hasta consolidarse como la  $TI$  que se impondría en el dominio de la química organometálica hasta nuestros días. Como se observa en el Gráfico 5, y en concordancia con la propuesta de Laudan, no fueron requeridos cambios globales en todos los principios fundantes de la  $TI_2$  para lograr un progreso dentro de la disciplina a

lo largo del siglo XX. Desde una perspectiva como la de Kuhn o Lakatos, el siguiente gran salto (revolución) de la  $TI_2$  sería casi 50 años después con el resurgir de la investigación en este dominio científico gracias a la aparición de los complejos tipo sándwich. Sin embargo, estaríamos perdiendo parte de la historia que ha configurado la tradición que hoy conocemos. Desde el enfoque que hemos venido planteando, esa revolución de los años cincuenta pertenece a una modificación interna dentro de la  $TI$ , lo cual será analizado en trabajos posteriores.



**GRÁFICO 6.** Gráfico de conductividad de sales de Pt estudiadas por Werner. Fuente: Tomado de (Ramberg, 2016).

Por ahora, se debe mencionar que la implementación de  $M_2$ , no sólo permitió a la  $TI_2$  constituirse en la mejor tradición aceptada, sino que trajo consigo una modificación en la axiología y los campos de acción de la química organometálica. Esto es un claro ejemplo de cómo los cambios metodológicos pueden ocasionar cambios en otros niveles, a diferencia de lo que planteaban Kuhn y Lakatos. Así pues, por un lado, se expandió el horizonte de comprensión de las sales de amonio a todas las entidades propias de la nueva tradición ( $A_1$   $\square$   $A_2$ ), lo que implicó una nueva serie de valores que configuraron  $TI_2$ . Por otro lado, motivó la consolidación de las entidades propuestas por la  $TI_2$  (complejos organometálicos) en compuestos importantes dentro de la síntesis en química orgánica ( $C_2$ ) (Werner H., 2009). Aunque esto se había realizado con otros reactivos en décadas anteriores (compuestos de Grignard, compuestos M-Alquilo propuestos por Frankland), la aparición de  $T_2$  que explicaba las propiedades de dichas sustancias, junto a estas nuevas metodologías, permitió la profundización y diversificación en este campo.

Pero,  $TI_2$  no permanecería estática. Durante las primeras dos décadas del siglo XX surge un problema relacionado con la comprensión de la valencia de los complejos ( $P_4$ ). Si bien los planteamientos de Werner promovieron una nueva forma de comprender este concepto, aún existían dudas sobre la forma en la que podía llevarse a cabo la coordinación de los grupos al metal, en términos de su estabilidad y reactividad. Dicha situación se constituía en un problema conceptual interno dentro de la  $TI_2$ . Algunos autores en este periodo brindaron luces para resolver el asunto. Tómese como ejemplo a Abegg (1902) y Lewis (1923), quienes reconocen un tercer tipo de enlace que intentan explicar en términos

de la coordinación propuesta por Werner. Los trabajos de estos científicos inspiraron una reflexión profunda en el campo y motivaron desarrollos conceptuales posteriores para clarificar el asunto. De allí que Sigdwick (1929), basado en las propuestas de Langmuir, planteara la Regla de los 18 electrones en su libro *The Electronic Theory of Valency*; y se diera el desarrollo de una Teoría de Campo Ligando basada en la Teoría de Orbitales Moleculares planteada por Hund, Mülliken, Slater y Lennard-Jones (Coulson, 1952). Este conjunto de supuestos básicos ( $T_3$ ) permitió resolver  $P_4$  y así, se constituyó en un nuevo cimiento teórico para  $TI_2$ . Además, era la opción más racional, pues ningún otro conjunto de principios resolvía el problema mencionado.

Una vez consolidada  $T_3$ , la aparición de nuevas metodologías ( $M_3$ ) (Werner H. , 2009) como la cristalografía, el infrarrojo (IR) y la Resonancia Magnética Nuclear (RMN), a la vez que el desarrollo de técnicas espectroscópicas más precisas y un avance en el uso de la difracción de rayos X (DRX) permitió un cambio radical en la  $TI_2$ , que adoptó  $M_3$  como su principio metodológico. Este vino de la mano con técnicas especializadas de síntesis propias de la tradición, como lo fueron la cocondensación en vapor de metal/ligando desarrollada por Timms en la Universidad de Bristol (Timms & Turney, 1977); o las técnicas de aislamiento de carbenos desarrolladas por Arduengo (Arduengo, Harlow, & Kline, 1991). Todos estos cambios metodológicos generaron una revolución en los campos de aplicación de  $TI_2$ , de tal manera que el uso de complejos metálicos en diversos procesos catalíticos ( $C_3$ ) era cada vez más común.

## Conclusiones

Hasta el momento, se ha realizado un análisis de la Teoría de Coordinación como Tradición de Investigación ( $TI_2$ ) desde el modelo de progreso científico propuesto por Laudan. Dicho análisis brinda luces alrededor de la importancia de enseñar esta disciplina haciendo uso de la historia y la filosofía de la ciencia.

En primer lugar, al pensar la enseñanza de la química desde ‘lo histórico’ permite, tanto a profesor como a estudiante, identificar los puntos clave dentro de la historia de la disciplina y los cambios en su naturaleza. Esto con el fin de poner a prueba los modelos tradicionales sobre la ciencia (Perez, 1993), permitiendo así corregir errores conceptuales que pueden implicar problemas graves para la formación de químicos a nivel universitario. Tómese como ejemplo los estudios con respecto al concepto de gases (Furió, Hernandez, & Harris, 1987) o disoluciones (Sanmarti & Izquierdo, 1995). De allí que comprender la historia de la química organometálica traiga consigo no sólo la inclusión de esta como una herramienta didáctica dentro del aula; si no como un metaconocimiento que puede orientar el proceso de aprendizaje de la asignatura.

En segundo lugar, el complementar la historia de la disciplina con una interpretación filosófica puede ayudar a solucionar diversos obstáculos que se pueden presentar a la hora de aprender química organometálica (Erduran & Mugaloglu, 2014). En especial, aquellos relacionados con la reducción de este campo del conocimiento al de la química inorgánica, pues se reconoce el camino propio que la disciplina ha recorrido. Además, puede ayudar a entender la forma en la cual la química organometálica es conceptualizada (Villaveces, 2000); promoviendo así el desarrollo de metodologías más efectivas de enseñanza de esta disciplina desde un punto de vista contextual y constructivista. Para finalizar, es importante mencionar que la interpretación filosófica de las líneas propias de la química organometálica será objeto de estudio de futuras publicaciones.

## Referencias

- Abegg, R. (1902). Versuch einer Theorie der Valenz und der Molekularverbindungen. *Christiania Videnskabs-Selskabets Skrifter*, 12.
- Arduengo, A. J., Harlow, R. L., & Kline, M. (1991). A Stable Crystalline Carbene. *Journal of American Chemical Society*, 361–363.
- Berzelius, J. (1830). Eine eigene Art von Platinsalzen. *Jahresber*, 162–163.
- Blomstrand, C. W. (1869). *Die Chemie der Jetztzeit*. Heidelberg: Winter.
- Brunner, H. (1969). Optical Activity at an Asymmetric Manganese Atom. *Angewandte Chemie International Edition*, 382–383.
- Cabrera, H. G., & Zambrano, A. C. (2009). Elementos para la enseñanza del concepto combustión utilizando la perspectiva de kuhn sobre la historia de la ciencia. *Research Gate*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/305930661>
- Colombo de Cudmani, L. (1997). Ideas Epistemológicas de Laudan y su posible influencia en la Enseñanza de las Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 17, 327-331.
- Coulson, C. A. (1952). *Valence*. Oxford: Clarendon Press.
- Cudmani, L. C., Pesa, M., & Salinas, J. (1999). Hacia un modelo integrador para el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 18, 3-13.
- De Berg, K. C. (2014). The Place of the History of Chemistry in the Teaching and Learning of Chemistry. En M. R. Matthews, *International Philosophy and Research in History, Handbook of Science Teaching* (págs. 317-342). New York: Springer.
- Duschl, R., & Gitomer, D. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 839-858.
- Erduran, S., & Mugaloglu, E. Z. (2014). Philosophy of Chemistry in Chemical Education: Recent Trends and Future Directions. En M. R. Matthews, *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (págs. 287-316). New York: Springer.
- Estany, A. (1998). Reconstrucción de Casos Históricos a partir del Modelo de progreso científico de L. Laudan. En W. J. González, *El pensamiento de L. Laudan. Relaciones entre Historia de la ciencia y Filosofía de la ciencia* (págs. 87-104). Coruña: Edición de Kindle.
- Estany, A., & Izquierdo, M. (1990). La evolución del concepto de afinidad analizada desde el modelo de S. Toulmin. *LLULL*, 13, 349-378.
- Frankland, E. (1849). Ueber die Isolirung der organischen Radicale. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 171–213.
- Furió, C. J., Hernandez, J. H., & Harris, H. H. (1987). Parallels between Adolescents' Conception of Gases and the History of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 64, 616–618.

- Garritz, A., Sosa, P., Hernández-Millán, G., López-Villa, N. M., Nieto-Calleja, E., Reyes-Cárdenas, F. d., & Haro, C. R. (2013). Una secuencia de enseñanza/aprendizaje para los conceptos de sustancia y reacción química con base en la Naturaleza de la Ciencia y la Tecnología. *Educación Química*, 24, 439-450.
- Kauffman, G. B. (1977). Christian Wilhelm Blomstrand (1826-1897) and Sophus Mads Jørgensen (1837-1914). Their Correspondence from 1870 to 1897. *Centaurus*, 44-63.
- Kauffman, G. B. (1977). Early Experimental Studies of Cobalt-ammines. *Humanities Press*, 393-403.
- Kekulé, A. (1865). Sur la constitution des substances aromatiques. *Bulletin de la Societe Chimique de Paris*, 98-110.
- Kuhn, T. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I. (1971). History of Science and its Rational Reconstructions. En R. Buck, & R.Cohen, *Boston Studies in the Philosophy of Science* (pág. 91).
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Londres: Routledge and Kegan.
- Laudan, L. (1978). From Theories to Research Traditions. *Universidad de California*, 368-379.
- Laudan, L. (1984). *Science and Values. The Aims of Science and their role in Scientific Debate*. California: Universidad de California.
- Lewis, G. N. (1923). *Valence and the Structure of Atoms and Molecules*. New York: Chemical Catalog Co.
- Perez, A. R. (1993). Modelos de Cambio Científico. En C. U. Moulines, *La Ciencia: Estructura y Desarrollo* (págs. 181-202). Madrid: Editorial Trotta.
- Ramberg, P. J. (2016). Alfred Werner and Coordination Chemistry, 1893-1914. En P. J. Ramberg, *Chemical Structure, Spatial Arrangement (Science, Technology and Culture, 1700-1945)* (págs. 277-319). New York: Taylor & Francis Group.
- Reisner, B. A., Stewart, J. L., Williams, S., Goj, L. A., Holland, P. L., Eppley, H. J., & Johnson, A. R. (2012). Virtual Inorganic Pedagogical Electronic Resource Learning Objects in Organometallic Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 89, 185-187.
- Röntgen, W. (1878). Über ein Aneroidbarometer mit Spiegelablesung. *Annalen der Physik und Chemie*, 305311.
- Sanmarti, N., & Izquierdo, M. (1995). The substantialisation of properties in pupils' thinking and in the history of chemistry. *Science & Education*, 4, 349-369.
- Seiffert Santos, S. C., & Borin da Cunha, M. (2019). A tradição de pesquisa segundo Laudan em educação em espaços não formais num evento de ensino de ciências. *Góndola. Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 14, 88-107.

- Sidgwick, N. V. (1929). *The Electronic Theory of Valency*. Oxford: Oxford University Press.
- Timms, P. L., & Turney, T. W. (1977). Metal Atom Synthesis of Organometallic Compounds. *Advances in Organometallic Chemistry*, 53–112.
- Van Driel, J., De Vos, W., & Verloop, N. (1998). Relating Students' Reasoning to the History of Science: The Case of Chemical Equilibrium. *Research in Science Education*, 28, 187–198.
- Velasco, J. M. (1995). El Cambio Científico y el Modelo de Solución de Problemas de L. Laudan. *Thémata. Revista de Filosofía*, 13, 199-210.
- Villani, A. (1992). Conceptual Change in Science and Science Education. *Science Education*, 76, 223-237 (1992).
- Villaveces, J. L. (2000). Química y Epistemología. Una relación esquivada. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 9-26.
- Werner, A. (1893). Beitrag zur Konstitution anorganischer Verbindungen. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 267–330.
- Werner, H. (2009). *Landmarks in Organo-Transition Metal Chemistry. A Personal View*. Würzburg: Springer.