

Estudio exploratorio en gestión de proyectos

Project Management: an exploratory study

Arturo Rodolfo Saenz Arteaga¹, Jhony Ostos Mariño², Kerstin Bremser³, Edmundo Lizarzaburu Bolanos⁴

Recibido: 01/2019

Aceptado: 09/2019

Resumen. - Diversos autores sostienen que la gestión de proyectos se conduce con técnicas cuantitativas que corresponden a un comportamiento de causa-efecto lineal; sin embargo, debería ser tratada con técnicas que corresponden a un comportamiento de causa-efecto no lineal. Este estudio explora el comportamiento de la gestión de proyectos bajo un enfoque de causa-efecto no lineal utilizando la teoría del caos y cuatro variables de gestión proyectos: tiempo, recurso humano, calidad, y costo. Se utiliza la ley de Parkinson y la teoría del caos, se formulan ecuaciones matemáticas para explicar el comportamiento de causa-efecto no lineal en la gestión de proyectos. El estudio fue realizado considerando la experiencia de la gestión en proyectos mineros. El modelo matemático encontrado puede ser utilizado por los académicos para profundizar el análisis de los motivos de la complejidad de la gestión de proyectos. Asimismo, este estudio es de utilidad para los gerentes en la toma de decisiones para el cálculo de la duración esperada del proyecto.

Palabras clave: Complejidad, caos, proyecto.

Abstract. -Several authors argue that project management is conducted with quantitative techniques that correspond to a linear cause-effect behavior; however, it should be treated with techniques that correspond to a nonlinear cause and effect behavior. This study explores the behavior of project management under a non-linear cause-effect approach using chaos theory and four project management variables: time, human resources, quality, and cost. Parkinson's law and chaos theory are used; mathematical equations are formulated to explain nonlinear cause-effect behavior in project management. The study was conducted considering the experience of management in mining projects. The mathematical model found can be used by academics to deepen the analysis of the reasons for the complexity of project management. Also, this study is useful for managers in making decisions to calculate the expected duration of the project.

Keywords: Complexity, chaos, Project

1 Esan University (Universidad Esan), asaenz@esan.edu.pe , ORCID iD: 0000-0002-4240-480X

2 Esan University (Universidad Esan) jostos@esan.edu.pe ORCID iD: 0000-0003-1888-7378

3 Pforzheim University, Kerstin.bremser@hs-pforzheim.de ,ORCID iD: 0000-0002-8263-7763

4 Esan University (Universidad Esan) elizarzaburub@gmail.com ORCID iD: 0000-0002-8862-5624

1 Introducción. - Desde que los proyectos son considerados como parte fundamental del logro de los objetivos estratégicos de la organización y no como un aporte artificial [1,2], el éxito de los proyectos se ha convertido en el tema más mencionado por los investigadores de la gestión de proyectos en los últimos años [3]. Los modelos de madurez [4], la lógica difusa [5], los modelos de simulación dinámica [6], el trabajo en equipo [7], la toma de decisiones [8] y la concepción misma del éxito del proyecto [9] han sido las principales áreas de investigación de la última década las cuales aportan conocimiento nuevo a los modelos ya establecidos [10].

A pesar de que estos modelos han sido desarrollados para lograr el éxito de un proyecto, algunas instituciones como: "The Standish Group", "eGovernment for Development Exchange (eGov4Dev)" [11], y "The Treasury Board of Canada Secretariat" han reportado, para sorpresa de muchos, que el éxito de los proyectos solo alcanza el 28% o 30% de los casos. Valores que son considerados muy bajos por Herzog [12] y que parecen no mejorar con el paso del tiempo [13].

Como reporta Rolfe et al. [13], en la Universidad de Oxford se realizó un estudio entre McKinsey y el BT Center for Major Program Management. Este estudio se desarrolló sobre una muestra de 5,400 proyectos de tecnología e investigación en un amplio rango de industrias. Los resultados del estudio fueron similares a los de "The Standish Group". La ejecución presupuestal del 50% de los proyectos, con un presupuesto de más de US\$ 15 millones, estaban en 45% por encima del presupuesto, y fueron finalizados con un retraso del 7% y con 56% menos de funcionalidad respecto de lo requerido originalmente [14]. Por otro lado, las fallas en los proyectos de tecnología e innovación no están aislados de las fallas que ocurren en otros tipos de proyectos, las cuales se pueden medir utilizando variables relevantes conocidas como triángulo de hierro: costo, tiempo y calidad [13].

En la investigación realizada en grandes proyectos de construcción en más de 20 países, [15] observo que "nueve de cada diez proyectos tienen sobrecostos. Los excesos de costos mayores a 50% es algo común, mientras que los excesos de costos en más del 100% no son tan frecuentes". Textualmente, Flyvbjerg [15] señaló: "Para un periodo de setenta años, para los cuales los datos están disponibles, los excesos de costos han sido constantes, lo que indica que ninguna mejora en la estimación y gestión de costos se ha hecho a lo largo del tiempo".

En concordancia con los comentarios anteriores, se puede sostener que el comportamiento real de los proyectos sufre de distorsiones en su calidad y retraso en los cumplimientos, por lo que es necesario proponer nuevas ópticas de análisis de la gestión de proyectos. Esto nos lleva a pensar que los modelos actuales, con sus variables involucradas, no están reflejando o explicando el comportamiento real de la gestión de proyectos [16].

En el ámbito de las perspectivas teóricas, se encuentra que las teorías formales como la teoría organizacional y las teorías relacionadas proveen información útil para el análisis de la gestión de proyectos. Tanto las teorías relacionadas, la teoría de la reestructuración, y la teoría de la complejidad proporcionan supuestos nuevos que permiten la aplicabilidad de un análisis matemático [17]. En concordancia con lo establecido previamente se plantea la pregunta de investigación: ¿Es posible proponer una ecuación matemática que ayude a predecir el comportamiento de la gestión de los proyectos en empresas (mineras) de países emergentes?

2 Revisión de literatura. -A pesar que a la fecha no existe un análisis claro de la teoría de proyectos [3], el objetivo del estudio es explorar la complejidad del comportamiento de la gestión de proyectos en un país emergente, usando las teorías formales y las relacionadas, para el cual se analizan cuatro constructos (gestión del tiempo, gestión del recurso humano, gestión de la calidad, y gestión del costo), las cuales forman tres variables del modelo de estudio propuesto (tiempo programado, tiempo expandido, cantidad de recurso humano).

2.1 Teoría de la complejidad en proyectos. -La complejidad de un proyecto se puede percibir con mucha frecuencia en aspectos como la dificultad de este (para lograr los objetivos del proyecto) y sus riesgos, asimismo Dao et al. [18], sostiene que estos dos factores principales influyen en gran medida en cómo se gestiona y ejecuta un proyecto. Se relaciona frecuentemente la dificultad del proyecto con la experiencia y conocimientos del equipo que está a cargo del proyecto, y al riesgo con la incertidumbre de las características del proyecto, asimismo la ISO, en su guía ISO 31000 del 2009 [19] define al riesgo como “el efecto de la incertidumbre en la consecución de los objetivos”.

Existen muchas definiciones de la teoría de complejidad y este es uno de los problemas teóricos, ya que no existe una definición exacta y común que haya sido aceptada. Asimismo, Valle (2000) [20] define: “un sistema complejo, es un conjunto que consta de varios elementos que interactúan entre sí de muchas maneras diferentes”. Por otra parte, Dao et al. [18], define: “la teoría de la complejidad generalmente explica lo que es un sistema complejo dentro de un área específica de interés (por ejemplo, natural, biológica, ecosistema, informática, sociedad humana o mercado financiero, etc.) y estudia la interacción entre los elementos de ese sistema”.

En función a lo anterior, podemos decir que el límite del conocimiento de la gestión de proyectos se evidencia más por conocimiento práctico que por investigación académica [3] y su complejidad está basada en conceptos de equipo y riesgo.

Es en base a esta limitada cantidad de información académica que podemos considerar lo indicado por Crawford, Hobbs and Turner (2004) [21] y Pich et al. [22], acerca de buscar teorías relacionadas que finalmente y a nuestro parecer nos ayuden a formular una ecuación matemática. Una teoría que puede tener relevancia en el estudio de la gestión de proyectos es la teoría del caos que se deriva de la teoría de la complejidad, dicha teoría fue sugerida para estudios de complejidad tecnológica por Shenhar and Dvir [23] y luego para estudios de complejidad organizativa por Baccarini [24].

La gestión de proyectos, una forma especializada de gestión, al igual que otras estrategias funcionales que se utilizan para lograr objetivos de negocio, estrategias y actividades dentro de un programa y presupuesto definidos [25], está asociada a la teoría de la complejidad debido al dinamismo que enfrentan los proyectos y la dependencia de sus condiciones iniciales. La teoría del caos, que es parte de la teoría de complejidad, es la ciencia más adecuada para intentar explicar el comportamiento de la gestión de proyectos [26].

Debido a que la gestión de proyectos sigue un patrón altamente dinámico, utilizaremos la teoría del caos para buscar una explicación del comportamiento del equipo (recurso humano) y las variables relevantes (tiempo, costo y calidad) las cuales fueron establecidas tempranamente por Atkinson [27]; Hazebroucq and Badot [28] y Westerveld [29]. De esta forma y usando diversos principios matemáticos formularemos proposiciones determinísticas.

2.2 El comportamiento Dinámico de la Gestión de Proyectos. -Singh, H. and Singh, A [26], afirman que una buena cantidad de conceptos sobre la teoría de la complejidad pueden ser obtenidos de la literatura relacionada a las ciencias y a la gerencia; mucho del comportamiento de la gerencia tiene una base implícita en la matemática y en la física, motivo por el cual en esta investigación utilizaremos estas ciencias para analizar el comportamiento de la gestión de proyectos. Siguiendo el pensamiento de Singh, H. and Singh, A. [26], la conducta de la gestión de proyectos debería estar representada en ecuaciones matemáticas como lo está las Finanzas, el Marketing, y la Economía entre otros, pero aún no se conoce en forma concluyente las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento de la gestión de proyectos. Este es el reto ya que, si aún no hay una explicación con una variable basada en la ciencia, no significa que no exista ninguna correspondencia para profundizar el análisis [30].

Si ya existieran ecuaciones basadas en la ciencia que explique los factores que influyen en el comportamiento de las variables, la conducta de la gestión de proyectos podría ser mejor explicada y hasta predecible. Dado que la gestión de proyectos tiene comportamientos cambiantes y dinámicos que dificultan su predictibilidad, se generan dudas de su aplicación en el logro de los objetivos estratégicos [31]. La gestión de proyectos tiene un comportamiento dinámico y la teoría del caos, como parte de la teoría de la complejidad, es la que mejor explica este comportamiento no lineal [30] e incluso en función de la estructuración matemática podría ser utilizado para predecir el comportamiento futuro [32]. Este es el escenario en el cual la teoría del caos y los sistemas dinámicos cobran importancia.

2.3 El modelo de la gestión de proyectos. -Así como Singh, H. and Singh, A. [26] profundizan el análisis del comportamiento dinámico de la gestión de proyectos, otros autores como Shenhar and Dvir [3] buscan definir un modelo del comportamiento de la gestión de proyectos. Singh, H. and Singh, A. [26] sostienen que buscar un modelo para la gestión de proyectos puede ser osado, pero no restrictivo si el análisis parte de la teoría del caos, el cual es una ciencia que puede ser aplicada a todos los campos de estudio social. Por otro lado, Olaniran et al. [33], concluye que conceptualizar los megaproyectos como un sistema caótico o no lineal puede proveer más contextos prácticos que ayuden a comprender como emergen los sobrecostos en este tipo de proyectos.

En este contexto varios investigadores en temas de gerencia han acordado que el “modelo esencial” de la relación de la teoría del caos con la gestión gerencial debe tener un comportamiento no lineal⁵, por la imprevisibilidad que tiene cualquier proyecto [30]. Una premisa para aplicar la teoría del caos en la gestión de proyectos es que el escenario de ocurrencia debe tener un comportamiento dinámico y no lineal. La ciencia del caos ha tenido impactos en diversos estudios, tales como el económico y el tiempo atmosférico entre otros, y el planteamiento es que la teoría del caos puede aplicarse en la planificación, en la dirección, en las inversiones, y en la gestión de proyectos, por las ocurrencias que siguen un patrón complejo. La teoría del caos siempre busca determinar un orden oculto en las ocurrencias naturales complejas y caóticas [34].

Para buscar la explicación de un “modelo esencial” primero se debe poner a prueba un planteamiento que pueda ser aceptado o falseado [35], entonces surge la siguiente pregunta ¿Cuál podría ser el modelo de la gestión de proyectos? El PMI [36], en su cuarta edición del PMBOK guide, sostiene que las fallas en el éxito de los proyectos se deben a la práctica de acciones débiles en planificación y en una inadecuada conformación del equipo de trabajo,

⁵ Comportamiento no lineal tiene que ver con la relación causa-efecto; es decir a una causa le corresponde no solo un efecto sino varios efectos dinámicos

entre otros. Estas afirmaciones de los motivos de éxito o falla de la gestión de proyectos tienen un aporte limitado porque el planteamiento se basa más en apreciaciones empíricas que en ciencia. Al respecto, Shenhar and Dvir [3] objetan esta limitada explicación y plantean la búsqueda de nuevos modelos que profundicen el análisis de la gestión de proyectos como es el caso del modelo de diamante.

Se pueden construir algunos modelos para analizar el rendimiento de las organizaciones en diversas áreas, tales como: comportamiento organizacional, equipos de producción, cultura organizacional y otras áreas que afectan la toma de decisiones y el rendimiento en el trabajo [26], no obstante, los estudios de la teoría del caos y su aplicación en la gestión de proyectos han traspasado los esfuerzos teóricos tempranos de Parker and Stacey y; están tratando de formular modelos prácticos que expliquen los sobre costos en megaproyectos sobre todo del sector hidrocarburos [17].

Es por ello que el modelo esencial del comportamiento de la gestión de proyectos debería incluir como patrón lo genérico en lugar de distinguir solamente lo específico, un ejemplo es la astronomía, que busca analizar el comportamiento del universo en lugar de sólo analizar las estrellas y las galaxias del universo. La búsqueda de un modelo de gestión de proyectos puede ayudar a mejorar el rendimiento y prevenir fracasos entre otros [26].

2.4 La teoría del caos. -El caos tiene diversas definiciones, por un lado, existen definiciones lingüísticas y de otro lado se tienen definiciones científicas [37]. Parker and Stacey [30] sostiene una definición lingüística, el caos consiste en un estado, condición o lugar donde existe gran desorden y confusión total. Singh, H. and Singh, A. [26], plantean una definición científica, el caos es un sistema sumamente sensible a la variación de las condiciones iniciales, con un comportamiento no periódico e imprevisible que por lo general está asociado a fenómenos turbulentos.

La definición científica plantea que el comportamiento dinámico de los sucesos es tal que la ciencia aún no ha desarrollado un modelo suficiente para determinarlo, si existe una relación causa efecto en el comportamiento lineal (predecible) es posible que existe una relación de causa y efecto en el comportamiento dinámico (impredecible). Haciendo una extensión del análisis, el tiempo atmosférico corresponde a flujos de materia y energía el cual supone que sigue las leyes de la mecánica newtoniana por lo que podría ser predecible, el problema se basa en encontrar todas las variables que se requieren para hacer predicciones exactas [26,38].

La teoría matemática del caos no estudia sistemas caóticos en el sentido literal de la palabra, sino formas particulares de comportamiento, es un contraste directo al pensamiento lineal o mecanicista, que explica que los sistemas son regulares, únicos, estables y predecibles [32]. El principio del universo ha sido catalogado como caótico en discrepancia con el orden relativo del movimiento de las estrellas y de las galaxias que deberían seguir un patrón, mientras no se conozca este patrón siempre se afirmará que el comportamiento es dinámico. El nombre genérico de la ciencia del caos es “la teoría de la complejidad” bajo la cual el “caos” es una forma particular de comportamiento [39].

2.5 El caos y la gestión de proyectos. -Establecer una relación directa entre la teoría del caos y la gestión de proyectos es una tarea complicada debido a que la información de casos comprobados es aún escasa, sin embargo diversos autores sostienen que la teoría del caos puede ser aplicada, aunque de manera matemática, al comportamiento de ciertos eventos que suceden en la gestión de las organizaciones [40,41,42,34] , esto significa que es viable entender el comportamiento de la gestión de proyectos y entender su modelo bajo la de la teoría del caos.

La gestión de proyectos sucede en realidades complejas y muchas veces con desorden en su ejecución, si revisamos las condiciones del inicio de cada proyecto, encontramos distintos problemas en el transcurso de su ejecución, los cuales podrían estar en concordancia con la teoría del caos; por ejemplo, los suministros de los equipos y maquinaria no llegan a tiempo, las grúas tienen problemas de mantenimiento, la programación de trabajos está fuera de control, los costos de preparación exceden el presupuesto, los dibujos y los planos tienen errores de precisión, y existe falta de comunicación, entre otros. Es aquí en donde la teoría del caos empieza a tener sentido para tratar de explicar los vacíos del comportamiento de la gestión de proyectos [30].

Por otro lado, la teoría del caos contradice la teoría convencional de la Gestión de Proyectos, ya que esta última define que el éxito de la gestión de proyectos depende de muchas variables como: Planeamiento, programa, control de calidad, tecnología, comunicación, liderazgo, recurso humano, así como monitoreo y control [43]. A la fecha, los factores que miden el éxito o fracaso de los proyectos han sido estudiados a posteriori, sin embargo, es necesario profundizar la evaluación a priori, la razón es que mucho del éxito del proyecto depende de las decisiones que se toman al inicio del proyecto, por ejemplo, el control excesivo del gasto de instalación, y la distribución equitativa de los recursos entre otros. El problema es que la relación entre el comportamiento del costo del proyecto y el apoyo sostenido de la organización depende de los resultados iniciales que se van obteniendo y estos factores aún no se han profundizado [26].

La manifestación de la teoría del caos en la gestión de costos de proyectos significa que pequeños cambios en las condiciones iniciales del costo, generan la necesidad de hacer otros cambios en estimados futuros de los costos [44]. Estos cambios iniciales generarán otros cambios hasta que el impacto total en los costos tenga un impacto considerable, es decir la incertidumbre del costo total del proyecto se incrementa con el tiempo y puede ser expresado mediante formulación matemática usando el exponente Lyapunov [17].

Estos pequeños cambios en las condiciones iniciales no son considerados en los estudios previos de Ahmed, Ruwanpura and Clark [45] los cuales indican que esta variable es aleatoria determinística por lo que un valor de contingencia debe ser añadido para poder estimarla. Por otro lado, Baccarini and Love [46] reportan que una aproximación determinística tradicional no es efectiva y por lo tanto se recomienda usar la teoría de probabilidades como una mejor aproximación al resultado. Esta dicotomía es resuelta por Olaniran et al. [17], quien señala que el comportamiento del costo ha sido el más estudiado por la teoría del caos. Se evidencia que su comportamiento es sensible a las condiciones iniciales y por lo tanto su dependencia se puede escribir matemáticamente.

Las decisiones iniciales del proyecto ocurren en condiciones de complejidad y muchas veces con poco control, es aquí donde la teoría del caos cobra importancia porque el descontrol puede llevar a sobrecostos [17]. No obstante, existen casos de éxito cuando se tienen proyectos que fueron terminados a tiempo, con alta rentabilidad, y con clientes satisfechos; estos dos escenarios se dan en un ambiente de complejidad donde la teoría del caos interviene, más aún cuando no hay casos de proyectos que fueron bien elaborados pero que al final sus resultados

fueron un fracaso. Estos eventos parece que suceden en un escenario caótico, pero debe existir un patrón oculto, quizás un modelo que explica en el tiempo las ocurrencias importantes que suceden y que el ser humano todavía no lo reconoce.

3 Aproximación determinística en la gestión de proyectos.

3.1 Gestión del tiempo. -Al momento de gestionar proyectos, ya sea de cualquier sector, se toman en cuenta tres fundamentos que son determinante para el cumplimiento de los objetivos, a estos fundamentos se les conoce como la triple restricción COSTO-TIEMPO-CALIDAD. Teniendo en cuenta esto, nos enfocaremos en la gestión de tiempo, Fons [47] sostiene que, la gestión de tiempo por su naturaleza y de forma consciente o inconsciente, está omnipresente en todos los proyectos. Por otro lado, el principal objetivo de la gestión del tiempo en proyectos según Valenzuela [48], es concluir el proyecto a tiempo, logrando el alcance del proyecto, en tiempo, costes y calidad requerida por el cliente, sin rebasar los riesgos inherentes del proyecto. Según la ley de Parkinson [49]: El trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible para que su culminación. Por lo que el valor esperado del tiempo para la culminación de una actividad siempre será mayor que el tiempo dado para la actividad. Veamos su aplicación en la Gestión de Proyectos cómo una forma de calcular la posible relación entre recurso y tiempo. Para encontrar dicha relación utilizaremos los conceptos preliminares de Gutiérrez and Kouvelis [50].

Sea la actividad “A”, la cual la podemos dividir en dos subtareas A1 y A2, tal que A2 suceda a A1, además podemos considerar que T1 y T2 sean los tiempos para cada subtarea. Si consideramos que “T” es el tiempo de culminación de la actividad A, entonces podemos afirmar que:

$$T = T_1 + T_2 \dots\dots\dots (1)$$

Esto según Parkinson [51] es incorrecto ya que el tiempo de culminación de una actividad deberá ser una función del tiempo disponible que se tiene para la actividad y no del tiempo de cada actividad ya que el trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible, y este puede ser igual o mayor que el tiempo de culminación o mejor llamado tiempo programado para cada actividad.

Denotando el tiempo disponible cómo “d”, entonces el tiempo de culminación deberá ser función de este tiempo, por lo que la ecuación de tiempos quedaría escrita así:

$$T = T(d) \dots\dots\dots (2)$$

Para poder ser consistentes con la Ley de Parkinson, el término “expansión de trabajo o $\omega(d)$ ” es ingresado para dar equilibrio a la ecuación (2), la cual podrá ser escrita cómo sigue:

$$T(d) = T_1 + T_2 + \omega(d) \dots\dots\dots(3)$$

Ahora, si la primera tarea es completada en T1, el valor esperado de la actividad “A” será $T_1 + E(T_2)$, donde “E” es la esperanza matemática, luego en la ecuación (3), la expansión del trabajo percibida por el trabajador será:

$$\omega(d) = (d - T_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots(4)$$

Nuevamente, para poder ser consistentes con la Ley de Parkinson, el resultado de la ecuación (4) deberá ser positivo y mayor o igual a cero, lo que indica que el trabajador ha expandido su trabajo. Reemplazando la ecuación (4) en (3) y por la ley de la monotonía, podemos fácilmente encontrar el tiempo de culminación esperado de la actividad “A”, así:

$$ET(d) = ET_1 + ET_2 + E(d - T_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots (5)$$

Para poder resolver la ecuación (5), debemos usar la inecuación de Jensen, pero para ello debemos demostrar que la ecuación (4) es convexa.

3.2 Teorema. – Sea, X_i , una variable aleatoria arbitraria y $f: R-R$, una función convexa tal que $E(f(x))$ es finita $\Rightarrow f(E(x)) < E(f(x))$, lo mismo ocurre si y solo si $f(x) = a + bx$; es decir: $E f(x)) > E(g(x)) = E(a+bx) = a+bE(x) = f(E(x))$; siempre y cuando $E(f(x)-g(x))=0$

Aplicando este Teorema a la ecuación (4) podemos ver que está es convexa en su rango y podemos afirmar que:

$$E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq E(d) - T_1 - ET_2 \dots\dots\dots (6)$$

Pero cómo T_1 es completado en el tiempo, entonces $E(T_1)=T_1$; y la $E(d) = d$, luego la ecuación (6) se transforma cómo sigue:

$$E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq d - ET_1 - ET_2 \dots\dots\dots (7)$$

y reordenando los términos tenemos:

$$ET_1 + ET_2 + E(d - T_1 - ET_2)^+ \geq d \dots\dots\dots (8)$$

luego (8) en (5)

$$ET(d) \geq d \dots\dots\dots (9)$$

Cómo lo indica la ecuación (9), según la ley de Parkinson, el tiempo esperado real para culminar la actividad “A” siempre será mayor que el programado cuando el trabajador tiene el perfil de “trabajador expansivo”. Este trabajador expansivo siempre percibe que el tiempo puede expandirse y es, en todos los casos, el culpable de que la programación no alcance el 100% de eficiencia. Al mismo tiempo puede existir su contraparte al perfil de trabajador expansivo, el cual es el “trabajador ocupado”, este trabajador no expande el tiempo por lo que los valores de los tiempos T_1 y T_2 serán siempre valores con una esperanza igual a la función. Nuevamente tomando la ecuación (3)

$$ET'(d) = ET_1 + ET_2 + \omega(d) \dots\dots\dots (10)$$

el valor de la expansión será igual a:

$$\omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots (11)$$

reemplazando (11) en (10) tenemos:

$$ET'(d) = ET_1 + ET_2 + (d - ET_1 - ET_2)^+ \dots\dots\dots (12)$$

La ecuación (11) puede tomar los valores de:
si:

$$\begin{aligned} \omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ = 0 &\Rightarrow ET'(d) = ET_1 + ET_2 \\ \omega(d) = (d - ET_1 - ET_2)^+ \neq 0 &\Rightarrow ET'(d) = d \end{aligned}$$

luego

$$ET'(d) = \max \{d, ET_1 + ET_2\} \dots\dots\dots (13)$$

De la ecuación (4), podemos ver que $ET'(d)$ es una función no decreciente y no negativa por lo que la ecuación (5) es también no decreciente y no negativa, por lo que podemos deducir que:

$$ET(d) \geq ET_1 + ET_2 \dots\dots\dots (14)$$

Como la ecuación (13) tiene una variable “d” con pendiente de 45°, hay un rango en un tiempo “t1” en que la ecuación (13) está por debajo del valor $ET_1 + ET_2$, luego entonces podemos concluir que para este rango la ecuación (14) queda:

$$ET(d) \geq ET'(d) \geq d \dots\dots\dots (15)$$

Reformulando las ecuaciones, en la *Figura I* se puede apreciar el comportamiento de ambos trabajadores.

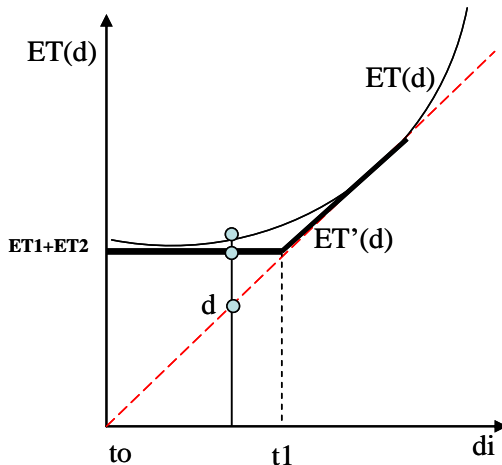


Figura I. - Valor esperado del tiempo ET(d) en función del tiempo programado (di)

El resultado de la ecuación (15) es muy importante, ya que indica que por más que se programe una actividad para que sea realizada en un tiempo “d”, el valor esperado para el culminar la actividad ET(d) siempre será mayor que la programada independiente del tipo de trabajador o recurso humano que se asigne a la actividad, luego la gráfica que podría resultar de esta proposición sería como lo indica la *Figura I* y podría seguir la siguiente ecuación cuadrática:

$$ET(d) = ET_1 + ET_2 + \Omega t^2 \dots\dots\dots (16)$$

Para facilidad de la ecuación podemos hacer que $E_0 = ET_1 + ET_2$, por lo que la ecuación (16) se podría escribir cómo:

$$ET(d) = E_0 + \Omega t^2 \dots\dots\dots (17)$$

además, según la *Figura I*:

$$\frac{\delta ET(d)}{\delta t} = \frac{\delta ET'(d)}{\delta d} \dots\dots\dots (18)$$

luego

$$\frac{\delta ET'(d)}{\delta d} = 1 \dots\dots\dots (19)$$

y

$$\frac{\delta ET(d)}{\delta t} = 2\Omega t \dots\dots\dots (20)$$

(20) y (19) en (18)

$$\Omega = \frac{1}{2d}; \forall t = d \dots\dots\dots (21)$$

(21) en (17)

$$ET(d) = E_0 + \frac{1}{2d} t^2 \dots\dots\dots (22)$$

Para un tiempo de actividad programado “d”, podemos reemplazar en (22) y tomar en cuenta la ecuación (19), para poder encontrar E0:

$$E_0 = \frac{d}{2} \dots\dots\dots (23)$$

Luego reemplazando (23) en (22), la ecuación del tiempo de una actividad en función del tiempo programado “d”, el cual es mayor a “t1” en la Fig. N°1, podría escribirse cómo sigue:

$$E(t) = \frac{d}{2} + \frac{1}{2d} T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots (24)$$

donde:

$$E(d) = \frac{d}{2} + \frac{1}{2d} d^2$$

Si el trabajador es del tipo “trabajador ocupado” o “trabajador expandido”, el valor esperado del tiempo programado para la actividad será:

$$E(d) = d$$

Para este caso, “d” es el tiempo programado para una actividad y “Texp” es el tiempo de expansión de la actividad dependiendo del tipo de trabajador o recurso utilizado en el proyecto.

3.3 Gestión de los Recursos Humanos. -Debido a que todo proyecto necesita recursos humanos para cumplir con su alcance y tiempo, se tomará en cuenta los conceptos de ingreso y salida de personal del proyecto. La razón de ingreso de personal debería ser un valor casi lineal pero debido a que en todo proyecto existe reasignación de personal, la razón debería decrecer muy rápido. La ecuación de Parkinson⁶ establece que el aumento de personal en un ambiente administrativo, suponiendo un ambiente de paz, está representado por la ecuación siguiente:

$$\Delta N = \frac{2N^m + t}{n} \dots\dots\dots (25)$$

donde:

ΔN : Aumento de personal.

N : El número de recursos que pretenden ingresar al proyecto, para nuestro caso, es el número de trabajadores que se necesitan subcontratar en adición.

m : Número de horas hombre dedicadas al trabajo. Podemos suponer entre 2 y 8 horas por actividad.

t : Tiempo transcurrido.

n : Número de personas a administrar.

Se puede expresar así la ecuación (25) de una manera más simple:

$$\Delta N = \phi N^m + \xi \dots\dots\dots (26)$$

Ahora, podemos definir el ingreso de personal al proyecto como sigue:

⁶ Está ley establece que el trabajo se expande hasta llenar el tiempo disponible para su culminación.

Al inicio del proyecto el número de recursos es igual a N_0 , pero si se cumple la primera ley de Parkinson, el número de recursos quedaría escrito de la siguiente forma:

$$N_1 = N_0 + \Delta N \dots\dots\dots (27)$$

reemplazando (27) en (26)

$$N_1 = N_0 + \phi N_0^m + \xi \dots\dots\dots (28)$$

Ahora, como un proyecto está sujeto a la planificación gradual, cada incremento o decremento de personal está en función siempre del personal anterior, por lo que la ecuación (28) puede suponerse recursiva. La ecuación (28) entonces puede ser escrita entonces como sigue:

$$N_{i+1} = N_i + \phi N_i^m + \xi \dots\dots\dots (29)$$

Debido a que todo proyecto está predestinado a reducir, localizar, o retirar personal, el efecto de estas variables afecta el normal flujo de personas y su permanencia en el proyecto. Definiendo al efecto de reducción como "D(N)", la ecuación (29) puede ser modificada como sigue:

$$N_{i+1} = N_i + \phi N_i^m + \xi - D(N) \dots\dots\dots (30)$$

luego el valor esperado de la cantidad de personal podría ser representado así:

$$E(N_{i+1}) = E(N_i + \phi N_i^m + \xi) - E(D(N))^\pm \dots\dots\dots (31)$$

Como el efecto de reducción siempre obliga al número inicial de recursos a disminuir, el valor esperado de D(N), siempre será negativo, por lo que siempre deberá ser mayor que el número de recursos que ingresan por la Ley de Parkinson. Entonces podremos representar D(N) como:

$$D(N) = K(N_{i+1} - N_i) = K\Delta N = K(\phi N_i^m + \xi) \dots\dots\dots (32)$$

donde: $K > 1$, entonces reemplazando (32) en (31) se tiene

$$E(N_{i+1}) = N_i + (1-K)\xi - (K-1)\phi N_i^m \dots\dots\dots (33)$$

Acomodando la ecuación (33) y suponiendo, por practicidad, $m = 2$; esta quedaría como sigue:

$$E(N_{t+1}) = \gamma N_t - \beta N_t^2 \dots\dots\dots (33)$$

Donde γN_t , representa el ingreso proporcionado de personal al proyecto y βN_t^2 , representa la reducción natural del personal del proyecto debido a la colocación, reducción o rotación. Con el fin de normalizar la ecuación, podemos reemplazar, N_t por $\frac{\gamma}{\beta} N_t$, luego reemplazando en la ecuación (33) obtenemos:

$$E(N_{t+1}) = \gamma \frac{\gamma}{\beta} N_t - \beta \left(\frac{\gamma}{\beta} N_t\right)^2$$

$$E(N_{t+1}) = \frac{\gamma^2}{\beta} N_t - \frac{\gamma^2}{\beta} N_t^2$$

luego la ecuación (33) quedaría como sigue:

$$E(N_{t+1}) = \frac{\gamma^2}{\beta} N_t (1 - N_t)$$

y cambiando el valor $\frac{\gamma^2}{\beta}$ por un Υ , tendremos la ecuación (34) normalizada.

$$E(N_{t+1}) = \Upsilon N_t (1 - N_t) \dots\dots\dots (34)$$

Donde Υ , representa la razón intrínseca del crecimiento de los recursos durante la ejecución del proyecto. Debido a que el valor N_{t+1} , es un valor futuro, el valor esperado es que mejor se ajusta en estos casos, por ello la ecuación (34) finalmente puede ser escrita como sigue:

$$E(N) = \Upsilon N (1 - N) \dots\dots\dots (35)$$

3.4 Gestión de la calidad. La calidad es un factor importante que se debe considerar en la gestión de proyecto, ya que según Cuatrecasas [52], la calidad es “el conjunto de características que posee un producto o servicio obtenidos en un sistema productivo, así como la capacidad de satisfacción de los requerimientos del usuario” (p.575). Por otro lado, Lizarzaburu [53] sostiene que, la calidad tiene que ver con cuan adecuado es un producto o servicio para el uso que se pretende hacer de él.

Considerando el concepto de la “triple restricción” (costo, calidad, y tiempo), en la fórmula matemática la calidad será considerada como variable dependiente de dos variables independientes: el costo y el tiempo de expansión, la razón es que esta variable está inmersa en el logro de los objetivos de costo del proyecto dentro de un tiempo programado. Normalmente se pueden satisfacer dos de las tres variables siguientes: Costo (C), Calidad (Q) y Tiempo (T), por lo que formularemos tres supuestos:

Supuesto N°1: Si se necesita terminar el proyecto dentro del tiempo o antes del mismo, probablemente tendremos que sacrificar la calidad y/o se tendrá que aumentar el costo.

Supuesto N°2: Si el proyecto se culmina antes de tiempo y con un costo bajo, entonces el resultado del mismo no tendrá la calidad esperada.

Supuesto N°3: Si se requiere que el producto tenga alta calidad, pero a bajo costo, entonces el tiempo de culminación se extenderá.

Estas tres suposiciones se pueden resumir en la *Tabla I* y formular las respectivas dependencias entre ellas.

Supuesto	Tiempo (T)	Costos (C)	Calidad (Q)	Dependencia
1	-	+	-	$Q \propto \frac{T}{C}$
2	-	-	-	$Q \propto TC$
3	+	-	+	$Q \propto \frac{T}{C}$

Tabla I. - Dependencias de calidad en función del tiempo y el costo

Dependiendo de la aleatoriedad del tiempo y costo, la calidad podría ser directa o inversamente proporcional al costo, por lo tanto, para mantener esta restricción, un exponente “n” será agregado a la ecuación en la variable costo (C), la cual puede ser (+) o (-), dependiendo de la condición inicial del proyecto o del alcance de este. Para esta primera aproximación suponemos que el valor del tiempo no tiene exponente. Siendo así, la ecuación para la Gestión de la Calidad podría ser escrita como sigue:

$$Q = K T_{exp} C^n \dots\dots\dots (36)$$

3.5 Gestión del costo. La variable costo debería ser constante o con varianza mínima, pero en la evaluación de proyectos es una de las variables más dinámicas y están sujetas a permanentes ajustes los cuales limitan el tiempo y el alcance del proyecto. El dinamismo del costo está en función del tiempo de expansión (T), las variables: costo y calidad condicionan los recursos del proyecto y el logro de los objetivos estratégicos en el tiempo programado (N). Por lo tanto, se pueden elaborar los siguientes supuestos:

Supuesto N°4: Si se necesita que el proyecto acabe antes de su tiempo de culminación, probablemente tendremos que invertir en más recursos lo cual incrementará el costo del proyecto.

Supuesto N°5: Si se necesita que el proyecto termine antes de su tiempo de culminación y a un costo por debajo del presupuestado, entonces el número de recursos tiene que ser escaso.

Supuesto N°6: Si requieres que el proyecto tenga un bajo costo y consuma un número bajo de recursos, entonces nos vamos a tardar en entregarlo.

Estas tres proposiciones se pueden resumir en la *Tabla II* y formular las respectivas dependencias entre ellas.

Supuesto	Tiempo (T)	Recursos (N)	Costo (C)	Dependencia
4	-	+	+	$C \propto \frac{N}{T}$
5	-	-	-	$C \propto NT$
6	+	-	-	$C \propto \frac{N}{T}$

Tabla II. - Dependencias del costo en función del tiempo y recurso

Dependiendo de cómo sea la aleatoriedad del tiempo y el recurso, el costo podría ser directa o inversamente proporcional al tiempo, por ello para salvar esta restricción, un exponente “n” será agregado a la ecuación en la variable tiempo (T), la cual puede ser (+) o (-), dependiendo de la condición inicial del proyecto o del alcance de este. Para esta primera aproximación suponemos que el valor del recurso no tiene exponente. Entonces la ecuación para la gestión del costo podría ser escrita como sigue:

$$C = \theta NT_{\text{exp}}^m \dots\dots\dots (37)$$

4 Evaluación determinística bajo la teoría del caos. -En el análisis de la gestión del tiempo se referenciaron dos tipos de trabajadores o de recursos humanos: “el trabajador que expande” el trabajo, y “el trabajador ocupado”. Si el trabajador es del tipo: “ocupado”, es muy probable que no expanda el trabajo debido a que tiene labores subsiguientes que desarrollar por lo que esta consiente que el programa debe ser completado en el tiempo dado. Para este tipo de trabajador, los factores de desmotivación, rotación de personal o reducción no son preocupantes porque él se encuentra dentro de una estructura funcional de proyectos donde el conocimiento reconocido en la organización. Si el trabajador es del tipo: “trabajador que expande”, dilatará lo más que pueda la culminación de la actividad, porque así puede aplazar la reducción, la rotación de personal el mayor tiempo posible. Estos tipos de comportamiento de trabajadores se observa en organizaciones orientadas a proyectos.

Entonces, para medir el dinamismo del comportamiento de la gestión de proyectos incluimos la variable recursos humanos en el modelo de gestión. Considerando el tiempo en expansión, el recurso humano, la calidad y el costo, podemos encontrar ecuaciones parciales en función del tiempo, los cuales según el teorema de Poincaré-Bedixon [54] y los estudios de

Sprott [55], generan caos y no son lineales. Se demuestra entonces que la gestión de proyectos tiene un comportamiento caótico no lineal y por lo tanto es afectado por un cambio en las condiciones iniciales. Las ecuaciones caóticas para la gestión del proyecto son las siguientes⁷:

$$\dot{Rat} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{exp}^2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\Upsilon(1-2N)} - \frac{T_{exp}}{(1-N)}} \right) \dots\dots\dots (I)$$

$$\dot{T}_{exp} = \left(\frac{\Upsilon}{m} \right) T_{exp} \left(\frac{1}{N} - 2 \right) \dots\dots\dots (II)$$

$$\dot{N} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{Rat}{1-N} \right) T_{exp}^2 \dots\dots\dots (III)$$

Rat, Texp y N, son variables referidas a la rotación programada (ecuación I), tiempo expandido (ecuación II), y cantidad de recurso humano del proyecto (ecuación III). Para este caso Υ ; ϕ y m , son parámetros constantes cuyo valor nos posiciona en el mundo caótico o determinístico. La resolución de estas tres variables nos lleva a identificar un amplio espectro de comportamiento de la gestión del proyecto el cual es dependiente del tipo de proyecto que se esté ejecutando. Dependiendo con que parámetro se empieza, el comportamiento de estas tres variables puede o no ser dependiente de las condiciones iniciales, es allí cuando ocurre el Caos.

5 Determinismo, falsación y caos. -Para comprender el determinismo, la falsación y el comportamiento caótico podemos hacer una representación gráfica que ilustren estos conceptos. Como se observa en la *Figura II*, la ecuación determinística que relaciona el tiempo de trabajo que expande un trabajador versus el tiempo del proyecto bajo un paradigma Newtoniano, tiene la forma de una línea continua con una ecuación cuadrática de la siguiente forma:

$$T_{exp} = -0.0002t^2 + 0.0006t + 1.02 \dots\dots\dots(38)$$

La tendencia de está gráfica es cuadrática descendente ya que cuando se inicia un proyecto, casi todos los trabajadores buscan conocer el proyecto en todos los aspectos y expanden mucho el tiempo de elaboración de la ingeniería, pero cuando el tiempo se acorta, la expansión del tiempo proyectada se recorta ya que hay límites y fecha de entrega para evitar penalidades y comenzar con otro proyecto, esto por supuesto en condiciones estables. Si observamos la ecuación (38),

La tendencia de ésta siempre será hacia abajo para cualquier valor del tiempo (t). Utilizando la ecuación de Parkinson, los eventos que involucra la expansión del tiempo de trabajo por parte del trabajador, depende de la cantidad de recursos “N” la cual fue formulada en la ecuación (II).

La ecuación (II) mantiene una tendencia ascendente primero y descendente después, el cual está representada por la línea negra gruesa (Fig. 2). Si notamos las tendencias de la ecuación (38) y (II), podemos decir que ambas son muy cercanas y pareciera que la variable “N”, correspondiente a los recursos del proyecto, no influye en nada con esta tendencia. Pero

⁷ Para mayor referencia ver el Anexo A.

¿qué pasa en el punto “A” ?, según se aprecia en la fig.2, está solución no corresponde a las ecuaciones (38) y (II) pero si existe en la realidad. De acuerdo con la ley de la falsación de Popper diremos que las ecuaciones (38) y (II) han sido falseadas tomando en cuenta el punto “O”. Entonces ¿a qué ecuación corresponde la línea de cuadrados que pasa por el punto “A” ?, la respuesta es: a la misma ecuación (II), la que anteriormente fue falseada. Lo que sucede es que la ecuación (II) es el resultado de un juego de tres ecuaciones diferenciales no lineales formuladas bajo la teoría del caos en la gestión de proyectos, por lo tanto, no es una ecuación determinística Newtoniana. Cómo se puede ver en la Figura No 2, la ecuación (II) que fue falseada, empieza con la curva de línea gruesa de color negro hasta el punto “O” y desde este punto hay una divergencia que pasa por el punto “A”, la cual resulta de pequeños cambios en las condiciones iniciales de la gestión de proyectos.

Si el proyecto empieza con unas condiciones iniciales establecidas, se espera que su comportamiento sea como lo muestra la curva negra de línea gruesa, pero lo que vemos aquí es que, si esas condiciones iniciales sufren una pequeña variación, los resultados en la extensión del tiempo para un proyecto, que parecía bajar, comienza a subir como lo muestra la línea de cuadros. De allí el caos.

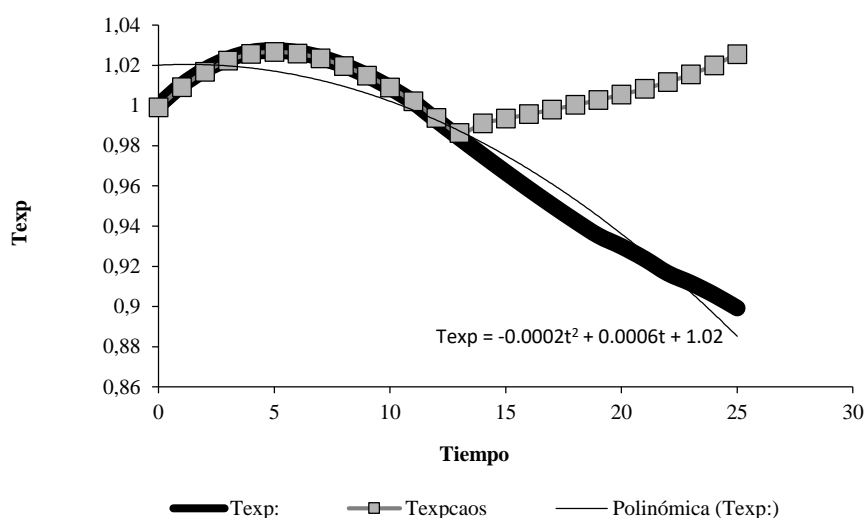


Figura II. Determinismo, falsación y Caos

6. Conclusión. -En el transcurso del desarrollo del estudio se encontraron tres ecuaciones matemáticas: Rotación programada (Rat), tiempo expandido (Texp), y cantidad de recurso humano (N), que explican la complejidad de la gestión de proyectos, las cuales se pueden observar en la Figura II como resultado de las ecuaciones I, II y III respectivamente. Mediante dichas ecuaciones se puede comprobar que existen razones para sostener que la gestión de proyectos es compleja, cuya duración esperada es difícil de predecir y que por lo general se subestima. En otras palabras, la duración real de los proyectos por lo general es mayor que la duración programada. Por poner un ejemplo, ¿Qué pasa cuando un proyecto está por concluir?, los trabajadores se preocupan por su futuro laboral, más aún si no tienen claro si van a continuar laborando en un nuevo proyecto, entonces ellos prefieren que el proyecto actual continúe y así buscan dilatar el tiempo de culminación. Esto significa que en la práctica la gestión de proyectos pasa por un proceso real de variables complejas difíciles de predecir, en donde el

ciclo de vida del proyecto está sujeto a eventos sensibles que empiezan en las condiciones iniciales, en las etapas de la ejecución, y en los ajustes de las condiciones del entorno.

En cuanto a la teoría del caos y su relación con la gestión de proyectos, Singh and Singh [26] indica que, debido al dinamismo del proyecto y su dependencia con las condiciones iniciales, la teoría del caos es la más adecuada para explicar el comportamiento dinámico no lineal del proyecto. De acuerdo con esta apreciación, en esta investigación se diseña un modelo con tres ecuaciones matemáticas que comprueba la complejidad de la gestión de proyectos.

El estudio está limitado a la gestión de proyectos en la gran minería, sin embargo, podría ser extendida a otro tipo de industrias tales como tecnología de información (TI), agroindustriales, así como a proyectos de pequeñas y medianas empresas. La investigación es de utilidad para los académicos porque pone en consideración un modelo matemático que sustenta la necesidad de seguir explorando los motivos de la complejidad de los proyectos.

En cuanto a los gerentes, se pone en consideración la revisión de más variables para tomar decisiones de calidad, costo, y recurso humano, los cuales influyen en el tiempo o en la duración esperada del proyecto.

En este ámbito empresarial se pueden construir a futuro relaciones causa -efecto mediante modelos cuantitativos que relacionen éxito con equipos y que puedan moderarse por variables como clientes, proveedores o tal vez el mismo efecto caos propuesto en estas ecuaciones.

Referencias

- [1] Kenny, J. (2003), "Effective Project Management for Strategic Innovation y Change in an Organizational Context", *Project Management Journal*, 34 (1): 43-53
- [2] Blasco, J. (2001), *Los proyectos, el proyectar y el proyectado*. POLITEXT Àrea d'Enginyeria Mecànica, Barcelona-España: Edicions UPC. En prensa.
- [3] Shenhar, A. J., y Dvir, D. (2007), "Project management research, The challenge y opportunity", *Project Management Journal*, 38 (2): 93-99.
- [4] Jugdev, K., y Thomas, J. (2002), "Project Management Maturity Models: The Silver Bullets of Competitive Advantage", *Project Management Journal*, 33 (4): 04-14
- [5] Liberatore, M. (2002), "Project Schedule Uncertainty Analysis Using Fuzzy Logic", *Project Management Journal*, 33 (4): 15-22.
- [6] Doloi, H. K., y Jaafari, A. (2002), "Toward a Dynamic Simulation Model for Strategic Decision-Making in Life-Cycle Project Management", *Project Management Journal*, 33 (4): 23-28.
- [7] Loo, R. (2002), "Journaling: A Learning Tool for Project Management Training y Team-Building", *Project Management Journal*, 33 (4): 61-66.
- [8] McCray, G. E., Purvis, R. L. y McCray, C. G. (2002), "Project Management Under Uncertainty: The Impact of Heuristics y Biases". *Project Management Journal*, 33 (1): 49-57.
- [9] Pennypacker, J.S. y Grant K.P. (2003), "Project Management Maturity: An Industry Benchmark", *Project Management Journal*, 34 (1): 4-11.
- [10] Bredillet, C. N. (2008), "Mapping the Dynamics of the Project Management Field: Project Management in Action (Part 1). From Editor", *Project Management Journal*, pp. 2-4.
- [11] eGovernment for Development Exchange, eGov4Dev (2005), *Un proyecto coordinado por el Institute for Development Policy y Management (IDPM) de la Universidad de Manchester* (www.egov4dev.org)
- [12] Herzog, V.L. (2001), "International student paper award winner: Trust building on corporate collaborative project teams", *Project Management Journal*, 32(1), 28-35.
- [13] Rolfe, B., Seagal, S., y Cicmil, S (2016), "An Existential Hermeneutic Philosophical Approach to Project Management", *Project Management Journal*, 47 (3): 48-62.

- [14] Bloch, M., Blumberg, S., y Laartz, J. (2012), Delivering large scale IT projects on time, on budget, y on value. McKinsey Quarterly. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/businessfunctions/business-technology/our-insights/delivering-large-scale-it-projects-on-time-on-budget-y-on-value>.
- [15] Flyvbjerg, B. (2014), “What you should know about megaprojects y why: An overview”, *Project Management Journal*, 45(2), 6–19.
- [16] Solarte, Leonardo & Sanchez-Arias, Luis. *Gérence De Projets Et Stratégie Organisationnelle: Le Modèle De Maturité En Gestion De Projets (Cp3m©) V5.0*. Innovar [online]. 2014, vol.24, n.52, pp.5-18. ISSN 0121-5051. <http://dx.doi.org/10.15446/innovar.v24n52.42502>.
- [17] Olaniran, O. J., Love, P. E. D., Edwards, D., J., Olatunji, O., y Matthews, J. (2015), “Chaotic Dynamics of Cost overruns in Oil & Gas Megaprojects: A Review”, *International Scholarly y Research y Innovation*, 9 (7).
- [18] Dao, B., Kermanshachi, S., Shane, J., Anderson, S., & Hare, E. (2016). Identifying and measuring project complexity. *Procedia Engineering*, 145, 476-482.
- [19] ISO, I. (2009). *ISO 31000: 2009. Risk management—Principles and guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [20] Valle Jr, V. 2000. *Chaos, Complexity and Deterrence*, National Defense Univ Washington DC
- [21] Crawford, L., Hobbs, J.B., y Turner, J.R. (2004), *Project Categorization systems*, Newton Square, PA: Project Management Institute.
- [22] Pich, M.T., Loch, C.H. y De Meyer, A. (2002), “On uncertainty, ambiguity and complexity in project management”, *Management Science*, 48 (8), 1008-1023.
- [23] Shenhar, A. J., y Dvir, D. (1995), “Managing Technology Projects: A Contingent Exploratory Approach”. *Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Pub. IEEE, pp. 494-503.
- [24] Baccarini. (1996), “The concept of project complexity – a review”. *International Journal of Project Management*, 14, pp 201-204.
- [25] Casares, I., & Lizaraburu, E. (2013). *Introducción a la Gestión Integral de Riesgos Empresariales*.
- [26] Singh, H., y Singh, A. (2002), “Principles of Complexity y Chaos Theory in Project Execution: A New Approach to Management”, *Cost Engineering*, 44(12), pp. 23-33.
- [27] Atkinson, R. (1999), “Project Management: Cost, time y quality, two best guesses y a phenomenon, it’s time to accept other criteria”, *International Journal of Project Management*, 17(1), 337-342.
- [28] Hazebroucq J.M., y Badot, J. (1996), *Le Management de project*. Paris: Presses Universitaires de France.
- [29] Westerveld, K. (2003), “The project excellence model: Linking success criteria y critical success factors”, *International Journal of Project Management*, 21, 411-418.
- [30] Parker, D. y Stacey, R. (1996), “Chaos, Management y Economics” (IEA Hobart)”, *Organization Studies*, 17: 150-153
- [31] Singh, A., y Vlatas, D. (1991), “Using Conflict Management for Better Decision Making”, *Journal of Management in Engineering*, ASCE, Vol. 7 (1), pp.70-82, Jan.
- [32] Schuldberg, D., (2011), *Chaos Theory y Creativity*, in *Encyclopedia of Creativity*, Mark y R.P. Steven, Editors. Academic Press: San Diego. p. 183-191.
- [33] Olaniran, O. J., Love, P. E. D., Edwards, D., J., Olatunji, O., y Matthews, J. (2016), “Cost Overruns in Hydrocarbon Megaprojects: A Critical Review y Implications for Research”, *Project Management Journal*, 46 (6): 126-138.
- [34] Stacey, R. D. (1992), *Managing the Unknowable: Strategic Boundaries between Order y Chaos in Organizations*, Jossey-Bass, San Francisco.
- [35] Popper, K.R. (1967), *Conocimiento Objetivo*. Barcelona, Ediciones Paidós Ibérica SA.
- [36] Project Management Institute Standards Committee - PMI (2008), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK™ Guide)*. Project Management Institute, Upper Darby, PA

- [37] Gleick, J. (1988), *Chaos: Making a New Science*, Penguin Books: New York, New York
- [38] Kellert, S.H. (1993), *In the Wake of Chaos*, Chicago: The University of Chicago Press, p2.
- [39] Markarian, R. y Gambini, R. (1997), *Certidumbres, Incertidumbres, Caos. Reflexiones en torno a la ciencia contemporánea*. Ediciones Trilce. Montevideo.
- [40] Gharajedaghi, J. (1999), *Systems Thinking, Managing Chaos y Complexity – a Platform for Designing Business Architecture*. Butterworth y Heinemann, MA.
- [41] Merry, U. (1995), *Coping with Uncertainty: Insights from the New Sciences of Chaos, Self-organization, y Complexity*. Praeger, Westport, Conn.
- [42] Pascale, R. T., Millemann, M., y Gioja, L. (2000), *Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature y the New Laws of Business*. Crown Business, Ryom House, NY.
- [43] Cooke-Davies T, et al., (2007), “Mapping the strange lysicscape of complexitytheory, y its relationship to project management”, *Project Management Journal*, 2007. 38(2): p. 50-61.
- [44] Moon, F.C. (2008), *Chaotic y Fractal Dynamics: Introduction for Applied Scientists y Engineers*: John Wiley y Sons.
- [45] Ahmed,T., Ruwanpura, J. Y. y Clark, R. (2005), “Predicting Schedule y Cost Elements Variation for EPC Projects in Alberta”, *Proceedings of Construction Research Congress*.
- [46] Baccarini, D, y Love, P. E. (2013), “Statistical Characteristics of Cost Contingency in Water Infrastructure Projects”, *Journal of Construction Engineering y Management*, 140(3).
- [47] Fons, T. (2010). *Omnipresente Gestión del Tiempo*. *Revista Profesional de la Gestión de Personas*, no. 4,54-63.
- [48] Valenzuela, E. (2008). *Gerencia de Proyectos, Gestión del Tiempo*. Recuperado de: <http://gerenciadeproyectos88.blogspot.com>
- [49] Parkinson, C.N. (1957), *Parkinson’s Law or The Pursuit of Progress*, Edición Española Parkinson: La ley 1982. Ediciones Grijalbo, S.A.
- [50] Gutierrez y Kouvelis, (1991), “Parkinson law and its implications for Project Management”, *Management Science*, 37(8), pp. 990-1001.
- [51] Parkinson, C.N. 1957. *Parkinson’s Law, or The Pursuit of Progress*. Edicion Española Parkinson: La ley 1982. Ediciones Grijalbo, S.A.
- [52] Cuatrecasas, L. (2012). *Gestión de la calidad total*. Madrid: Díaz de Santos
- [53] Lizarzaburu, E. R. (2016). *La gestión de la calidad en Perú: un estudio de la norma ISO 9001, sus beneficios y los principales cambios en la versión 2015*. *Universidad & Empresa*, 18(30), 33-54
- [54] Coddington, Earl A. y Levinson, Norman (1955), *The Poincaré–Bendixson Theory of Two-Dimensional Autonomous Systems. Theory of Ordinary Differential Equations*, New York: McGraw-Hill, pp. 389–403. ISBN 0-89874-755-4.
- [55] Sprott, J.C, (1994), *Some simple chaotic flows*. *Physical Review E*. 50.

Anexo: Demostración de las ecuaciones.

A1. Eficacia de los equipos de proyectos

Dividiendo (35) entre (24), la nueva ecuación sería como sigue:

$$\text{Rat}(N, T_{\text{exp}}) = \frac{\Upsilon N(1-N)}{\frac{d}{2} + \frac{1}{2d} T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (41)$$

Para dar más flexibilidad a la ecuación (41), su denominador lo podríamos remplazar por el término ϕT_{exp}^2 de modo que la ecuación quedaría como sigue:

$$\text{Rat}(N, T_{\text{exp}}) = \frac{\Upsilon N(1-N)}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (42)$$

en la ecuación (42), derivamos parcialmente respecto a N y Texp

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial N} = \frac{\Upsilon(1-2N)}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (43)$$

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial T_{\text{exp}}} = -\frac{2\Upsilon N(1-N)}{\phi T_{\text{exp}}^3} \dots\dots\dots (44)$$

la ecuación (43) se puede escribir como:

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial N} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} - \frac{2\Upsilon N}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (45)$$

la ecuación (44) se puede escribir como:

$$\frac{T_{\text{exp}} \partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{(1-N) \partial T_{\text{exp}}} = -\frac{2\Upsilon N}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (46)$$

luego (46) en (45)

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial N} - \frac{T_{\text{exp}} \partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{(1-N) \partial T_{\text{exp}}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (47)$$

en la ecuación (36), derivamos parcialmente respecto a “Texp” y “C”

$$\frac{\partial Q}{\partial T_{\text{exp}}} = KC^n \dots\dots\dots (48)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = nKT_{\text{exp}} C^{n-1} \dots\dots\dots (49)$$

luego (49) en (48)

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = \frac{nT_{\text{exp}}}{C} \frac{\partial Q}{\partial T_{\text{exp}}} \dots\dots\dots (50)$$

En la ecuación (37) derivamos respecto a “N” y “Texp”

$$\frac{\partial C}{\partial N} = \theta T_{\text{exp}}^m \dots\dots\dots (51)$$

$$\frac{\partial C}{\partial T_{\text{exp}}} = m\theta N T_{\text{exp}}^{m-1} \dots\dots\dots (52)$$

luego (52) en (51)

$$\frac{\partial C}{\partial T_{\text{exp}}} = \frac{mN}{T_{\text{exp}}} \frac{\partial C}{\partial N} \dots\dots\dots (53)$$

Colocando la ecuación (47) en función del tiempo “t”, tendremos el siguiente cambio en la derivada parcial:

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial N} \left(\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial T_{\text{exp}}} \right) - \frac{T_{\text{exp}} \partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{(1-N) \partial T_{\text{exp}}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots (54)$$

luego la ecuación se transforma en lo siguiente:

$$\frac{\partial \text{Rat}(N, T_{\text{exp}})}{\partial T_{\text{exp}}} \left(\frac{1}{\frac{\partial N}{\partial T_{\text{exp}}} - \frac{T_{\text{exp}}}{(1-N)}} \right) = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \dots\dots\dots (55)$$

De la ecuación (35), vemos que el valor esperado del recurso está en función del recurso anterior por lo que la ecuación es simultanea se podrá graficar como una parábola inversa. Si hacemos analogía al histograma de recursos de los proyectos en función del tiempo para un delta de tiempo pequeño, podemos ver que la gráfica de los histogramas tiene también la forma de una parábola invertida, por lo que puede suponerse que:

$$\text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta T_{\text{exp}}} \cong \text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E(N)}{\Delta N}; \forall N : 0-1; \forall T : t_1 \rightarrow T_{\text{exp}} \quad (56)$$

luego:

$$\text{Lim}_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\partial E(N)}{\partial T_{\text{exp}}} = \Upsilon(1-2N) \dots\dots\dots (57)$$

entonces (57) en (56)

$$\dot{\text{Rat}} = \frac{\Upsilon}{\phi T_{\text{exp}}^2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\Upsilon(1-2N)} - \frac{T_{\text{exp}}}{(1-N)}} \right) \dots\dots\dots (58)$$

Tomando la inversa a la ecuación (50) y colocándola en función del tiempo “t”, tendremos el siguiente cambio en la derivada parcial:

$$\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial C} \left(\frac{\partial T_{\text{exp}}}{\partial T_{\text{exp}}} \right) = \frac{T_{\text{exp}}}{mN} \frac{\partial N}{\partial C} \dots\dots\dots (59)$$

luego, poniendo la derivada en función del tiempo:

$$\dot{T}_{\text{exp}} = \left(\frac{\Upsilon}{m} \right) \frac{T_{\text{exp}}}{N} (1-2N) \dots\dots\dots (60)$$

luego en la ecuación (60), podemos remplazar la nueva variable de modo que:

$$\frac{\partial N}{\partial T_{\text{exp}}} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{\text{Rat}}{1-N} \right) T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots (61)$$

$$\dot{N} = \Upsilon - 2\phi \left(\frac{\text{Rat}}{1-N} \right) T_{\text{exp}}^2 \dots\dots\dots (62)$$

A.2. Limitación de variables

De la ecuación (35), podemos encontrar el rango de valores para la variable normalizada “N” que en su forma original era N_t .

$$E(N) > 0 \Leftrightarrow N_t < 1 \dots\dots\dots (63)$$

$$N = \frac{\beta}{\gamma} N_t \dots\dots\dots (64)$$

pero de la ecuación (I), vemos que además en su denominador debe de cumplirse que:

$$(1 - 2N) \neq 0; (1 - N) \neq 0 \rightarrow N \neq \left\{ \frac{1}{2}; 1 \right\} \dots\dots\dots (65)$$

además, en el denominador de la ecuación (I) debe de cumplirse que:

$$\frac{1}{\Upsilon(1 - 2N)} - \frac{T_{\text{exp}}}{(1 - N)} > 0 \dots\dots\dots (66)$$

luego;

$$T_{\text{exp}} < \frac{(1 - N)}{(1 - 2N)} \left(\frac{1}{\Upsilon} \right) \dots\dots\dots (67)$$

con estas salvedades, podemos decir que la ecuación (I), siempre será positiva.

$$Rat > 0 \dots\dots\dots (68)$$