

DISEÑO DE METAHEURÍSTICAS PARALELAS CON EL PARADIGMA *NOVELTY SEARCH* PARA LA REDUCCIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA PREDICCIÓN DE FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN

Jan Strappa^{ab}, Paola Caymes Scutari^{ab} y Germán Bianchini^a

^aLaboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido (LICPaD),
Dpto. de Ingeniería en Sistemas de Información - UTN-FRM - Mendoza - Argentina.

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

jstrappa@frm.utn.edu.ar, pcaymesscutari@frm.utn.edu.ar, gbianchini@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

Los incendios forestales son un fenómeno ambiental multicausal de gran prevalencia. El impacto de este fenómeno incluye pérdidas humanas, daños ambientales y económicos. Para mitigar estos daños, existen sistemas de simulación computacionales que predicen el comportamiento del fuego en base a un conjunto de parámetros de entrada o escenario (velocidad, dirección del viento; temperatura; etc.). Sin embargo, los resultados de una simulación suelen tener un alto grado de error por la incertidumbre en los valores de algunas variables, por no ser conocidos o porque su medición puede ser imprecisa o errónea. Por este motivo se han desarrollado métodos que combinan resultados de un conjunto de simulaciones sobre distintos escenarios, para detectar tendencias y así reducir dicha incertidumbre. Dos propuestas recientes, ESSIM-EA y ESSIM-DE, utilizan algoritmos evolutivos paralelos para orientar el espacio de escenarios a considerar, logrando mejoras en la calidad predictiva. Estos enfoques están guiados por una función objetivo que recompensa el avance hacia una solución. En problemas complejos, dicha función objetivo no siempre es un indicador directo de la calidad de las soluciones. En trabajos previos se han encontrado limitaciones como convergencia prematura, y se han requerido acciones de calibración y sintonización para incorporar soluciones más diversas al proceso de

predicción. Para superar estas limitaciones, en este trabajo proponemos aplicar el paradigma *Novelty Search* (búsqueda basada en novedad), que reemplaza la función objetivo por una medida de la novedad de las soluciones encontradas, para generar continuamente soluciones con comportamientos diferentes entre sí. Este enfoque logra evitar óptimos locales y permitiría encontrar soluciones útiles que serían difíciles de hallar por otros algoritmos. Al igual que los métodos existentes, esta propuesta también puede aplicarse a otros modelos de propagación (inundaciones, avalanchas o corrimientos de suelo).

Palabras Clave: Predicción de Incendios Forestales, Metaheurísticas, Búsqueda Basada en Novedad, Reducción de Incertidumbre.

CONTEXTO

El proyecto aquí descrito se está llevando a cabo en el marco de una línea de investigación que se ha desarrollado a lo largo de los últimos años en el LICPaD (Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido), en la UTN-FRM. Esta línea involucra el desarrollo de un sistema de predicción del comportamiento de fenómenos de propagación, aplicado al caso particular del avance de la línea de fuego en incendios

forestales. Este tipo de sistema utiliza un modelo de simulación que toma como entrada un conjunto de parámetros, que describen características que afectan a la propagación. Los métodos desarrollados por el grupo tienen como objetivo la reducción de incertidumbre en estas simulaciones, dado que las limitaciones para proveer parámetros de entrada correctos para el modelo conducen a errores en la precisión de la predicción. Recientemente se han desarrollado sistemas que utilizan métodos evolutivos para obtener predicciones basadas en un conjunto de simulaciones. En este proyecto, se propone el uso de una metaheurística dentro de un paradigma de búsqueda alternativo, llamado *Novelty Search* o búsqueda por novedad.

1. INTRODUCCIÓN

Las herramientas para predecir el comportamiento de los incendios forestales son de gran interés para la toma de decisiones en el control de incendios, con el fin de mitigar sus consecuencias. Existen diversos simuladores, los cuales utilizan modelos de propagación cuyo objetivo es predecir la evolución de la línea de fuego a lo largo de un período de tiempo, representada por mapas que indican el área del terreno alcanzada por el fuego en cada paso de predicción. Desde el punto de vista computacional, este problema de predicción es desafiante debido a la complejidad de los modelos utilizados y a las fuentes de incertidumbre involucradas en los datos de entrada. Este último aspecto es de gran importancia dado que las limitaciones para proveer parámetros de entrada correctos para el modelo conducen a errores en la predicción. Esta incertidumbre se debe a la dificultad o imposibilidad de obtener los valores de las variables involucradas. Para enfrentar esta incertidumbre, se han propuesto métodos que combinan resultados de múltiples simulaciones para analizar la tendencia, y así mitigar los efectos negativos de la incertidumbre. Recientemente, se han desarrollado dos

sistemas con este enfoque: ESSIM-EA [1, 2] y ESSIM-DE [3]. Ambos combinan una etapa de Optimización, para obtener escenarios cuya simulación permita obtener buenas predicciones, con una etapa de Análisis Estadístico, que logra la agregación de mapas obtenidos durante la optimización, para así poder predecir el comportamiento de la línea de fuego. Para manejar la alta carga de cómputo, ambos se basan en un *modelo de islas* [4], utilizando una doble jerarquía de procesos que les permite abarcar mejor el espacio de búsqueda y acelerar la optimización. Adicionalmente, y con el fin de mejorar la calidad y la eficiencia de estos métodos, se ha trabajado en incorporar a estos sistemas distintos mecanismos de *sintonización*. Las estrategias de sintonización permiten calibrar algún aspecto crítico, cuello de botella o factor limitante de la aplicación para mejorar su desempeño, y estas pueden ser automáticas (cuando las técnicas están incorporadas en la aplicación de forma transparente) y dinámicas (los ajustes ocurren durante la ejecución) [5].

A pesar de que los enfoques mencionados han obtenido mejoras respecto a métodos anteriores, aún tienen algunas limitaciones. Las metaheurísticas de estos enfoques utilizan una función de aptitud o *fitness* para evaluar la calidad de las soluciones. Esta función se usa para evaluar la calidad de los individuos (soluciones encontradas durante la búsqueda) y así guiar la búsqueda de manera que las poblaciones sucesivas contengan individuos con mejor *fitness* a lo largo de las iteraciones, con el objetivo de que la población eventualmente converja a una única solución. Mediante este mecanismo, a lo largo del tiempo aparecen genotipos (codificación de los individuos) cada vez más similares entre sí, por lo que, en este caso, la población que fue evolucionada para realizar las predicciones en cada intervalo de tiempo puede consistir en un conjunto de escenarios muy cercanos unos a otros, lo que limita el aporte de estas soluciones a la reducción de incertidumbre.

Además, se dejan de lado soluciones que pueden estar genotípicamente alejadas en el espacio de búsqueda, pero que aun así pueden tener valores de aptitud aceptables que contribuyan a la predicción. Estas limitaciones llevan a considerar la selección de otros enfoques de búsqueda que puedan producir mejoras en la calidad de las predicciones.

En base a este análisis, se observó la posibilidad de utilizar un paradigma alternativo al de las metaheurísticas tradicionales: la *búsqueda basada en novedad* o *Novelty Search* (NS) [6–8]. Este es un paradigma de búsqueda que ignora el objetivo como guía para la exploración y, en su lugar, recompensa a soluciones candidatas que presentan comportamientos novedosos (diferentes a los anteriormente descubiertos), con el fin de maximizar la exploración y evitar óptimos locales. Se ha aplicado con buenos resultados a múltiples problemas de diversas áreas [6, 7], [9–11]. La búsqueda basada en novedad es una alternativa prometedora frente a las limitaciones de las metaheurísticas aplicadas previamente al problema, debido a que, en este paradigma alternativo, la búsqueda es dirigida por una caracterización del comportamiento de los individuos, cambiando así el *paisaje de la función de fitness* (*fitness landscape*), previniendo de manera directa los problemas de convergencia prematura y estancamiento. Por último, en la literatura existen múltiples enfoques híbridos que combinan *fitness* y novedad y se ha demostrado que son efectivos para resolver problemas prácticos [7, 9, 10], [12–15]. Estas contribuciones indican que son muchas las alternativas a explorar en el área de NS, y por lo tanto las oportunidades de adaptabilidad de este tipo de algoritmos a distintos problemas.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Los sistemas de predicción existentes han obtenido resultados satisfactorios para la reducción de incertidumbre en el problema de aplicación. En particular, ESSIM-EA demostró obtener predicciones de buena calidad, mientras que ESSIM-DE redujo significativamente los tiempos de respuesta, pero sin obtener mejoras en calidad. Por esta razón, posteriormente se ha trabajado en mejorar el rendimiento del método ESSIM-DE mediante estrategias denominadas de sintonización [16]. Se desarrollaron dos de estas métricas [17, 18], ambas orientadas a mitigar los problemas de convergencia prematura y estancamiento de la población presentes en el caso de aplicación del algoritmo, obteniendo mejoras en calidad y tiempos de respuesta.

Dadas las características del problema y los resultados previos, se espera que un algoritmo que implemente NS pueda obtener buenos resultados en calidad y, dependiendo del algoritmo elegido y sus posibilidades de paralelización, también mejoras en eficiencia. El enfoque NS es adecuado para este problema, por un lado, porque resuelve por diseño los problemas propios de algoritmos explotativos; por otro lado, porque presenta múltiples oportunidades de paralelización y de hibridación con enfoques basados en *fitness*. También es posible adaptar el comportamiento del algoritmo de acuerdo a las características del problema. Respecto a la posibilidad de aplicación de mecanismos de sintonización, en el caso de NS, también es factible suponer que un proceso de sintonización sería capaz de contribuir predicciones más precisas y en menor tiempo para el caso propuesto; por ejemplo, implementando la modificación, de forma automática y dinámica, de alguno de los aspectos antes mencionados. La presente línea de investigación plantea la implementación de una metaheurística adaptada al paradigma NS,

comenzando con una versión simple para luego poder implementar mejoras iterativas en base a las posibilidades previamente descritas. En una primera versión se paralelizará solo el cómputo de las evaluaciones de individuos, mientras que a futuro se podrán explorar métodos como el modelo de islas para este nuevo enfoque.

3. OBJETIVOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

El objetivo general de esta investigación consiste en la reducción de incertidumbre en sistemas de predicción de fenómenos de propagación mediante un enfoque paralelo de búsqueda por novedad, aplicado al caso de incendios forestales. Se espera que este nuevo enfoque pueda obtener resultados experimentales de calidad comparable o superior a los métodos existentes. Posteriormente, mediante la incorporación de métodos adicionales de paralelización, se esperan posibles mejoras tanto en calidad como en eficiencia, respecto a la primera versión. A nivel teórico, se espera que los resultados experimentales provean nuevo conocimiento que permita caracterizar mejor el problema, mediante el análisis de las predicciones basadas en NS y su comparación con resultados de métodos anteriores.

A largo plazo, se plantean objetivos que pueden obtener mejoras adicionales. Por un lado, extender el método desarrollado mediante estrategias híbridas de búsqueda que combinen novedad y *fitness*. Por otro lado, diseñar métodos de sintonización que permitan variar los parámetros de dichas estrategias híbridas con el fin de proveer mayor adaptabilidad al algoritmo frente a diversas instancias del problema.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El grupo de trabajo para esta investigación se encuentra conformado por el Dr. Jan Strappa,

quien se incorporó al laboratorio en 2021 con una beca postdoctoral de CONICET, dirigida por la Dra. Paola Caymes Scutari y codirigida por el Dr. Germán Bianchini. En 2020 se defendieron dos tesis doctorales relacionadas con esta línea de investigación, desarrolladas por la Dra. Laura Tardivo (bajo la dirección de la Dra. Paola Caymes Scutari) y el Dr. Miguel Méndez Garabetti (bajo la dirección del Dr. Germán Bianchini y la codirección de la Dra. Paola Caymes Scutari).

El grupo de trabajo siempre está abierto a la incorporación de nuevos integrantes (de grado o postgrado) que deseen familiarizarse con las temáticas con las que se trabaja dentro del mismo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Méndez Garabetti, G. Bianchini, M. L. Tardivo, and P. Caymes Scutari, "Comparative Analysis of Performance and Quality of Prediction Between ESS and ESS-IM," *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 314, pp. 45–60, Jun. 2015.
- [2] M. Méndez Garabetti, G. Bianchini, P. Caymes Scutari, M. L. Tardivo, and V. Gil Costa, "ESSIM-EA applied to Wildfire Prediction using Heterogeneous Configuration for Evolutionary Parameters," *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, p. 10, 2017.
- [3] M. L. Tardivo, P. Caymes Scutari, G. Bianchini, and M. Méndez Garabetti, "Hierarchical parallel model for improving performance on differential evolution: Hierarchical parallel model for improving performance on differential evolution," *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 29, no. 10, p. e4087, May 2017.
- [4] E. G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. 2009.

- [5] P. Caymes Scutari, G. Bianchini, A. Sikora, and T. Margalef, “Environment for automatic development and tuning of parallel applications,” in *2016 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, 2016, pp. 743–750.
- [6] J. Lehman and K. O. Stanley, “Abandoning Objectives: Evolution Through the Search for Novelty Alone,” *Evolutionary Computation*, vol. 19, no. 2, pp. 189–223, Jun. 2011.
- [7] J. Lehman and K. O. Stanley, “Exploiting Open-Endedness to Solve Problems Through the Search for Novelty,” *Artificial Life*, p. 8, Jan. 2008.
- [8] J. Lehman and K. O. Stanley, “Evolvability Is Inevitable: Increasing Evolvability without the Pressure to Adapt,” *PLoS ONE*, vol. 8, no. 4, pp. 2–10, 2013.
- [9] J. Gomes, P. Urbano, and A. L. Christensen, “Evolution of swarm robotics systems with novelty search,” *Swarm Intelligence*, vol. 7, nos. 2-3, pp. 115–144, Sep. 2013.
- [10] P. Krčah, “Solving Deceptive Tasks in Robot Body-Brain Co-evolution by Searching for Behavioral Novelty,” in *Advances in Robotics and Virtual Reality*, vol. 26, J. Kacprzyk, L. C. Jain, T. Gulrez, and A. E. Hassanien, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 167–186.
- [11] C. Ollion and S. Doncieux, “Why and how to measure exploration in behavioral space,” in *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation - GECCO '11*, 2011, p. 267.
- [12] J. Gomes, P. Mariano, and A. L. Christensen, “Devising Effective Novelty Search Algorithms: A Comprehensive Empirical Study,” in *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2015, pp. 943–950.
- [13] J.-B. Mouret and S. Doncieux, “Encouraging Behavioral Diversity in Evolutionary Robotics: An Empirical Study,” *Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 1, pp. 91–133, Mar. 2012.
- [14] J. K. Pugh, L. B. Soros, P. A. Szerlip, and K. O. Stanley, “Confronting the Challenge of Quality Diversity,” in *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2015, pp. 967–974.
- [15] J.-B. Mouret and J. Clune, “Illuminating search spaces by mapping elites,” *arXiv:1504.04909 [cs, q-bio]*, Apr. 2015.
- [16] K. Naono, K. Teranishi, J. Cavazos, and R. Suda, Eds., *Software Automatic Tuning*. New York, NY: Springer New York, 2010.
- [17] M. L. Tardivo, P. Caymes Scutari, M. Méndez Garabetti, and G. Bianchini, “Optimization for an Uncertainty Reduction Method Applied to Forest Fires Spread Prediction,” in *Computer Science 2017*, vol. 790, A. E. De Giusti, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 13–23.
- [18] M. L. Tardivo, P. Caymes Scutari, G. Bianchini, and M. Méndez Garabetti, “Sintonización Dinámica del Método Paralelo de Predicción de Incendios Forestales ESSIM-DE,” *XXV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, p. 10, 2019.